

DESIGNERS'  
GUIDES TO THE  
EUROCODES

altri  
titoli

# GUIDA ALL'EUROCODICE 1

AZIONI DEL VENTO:  
EN 1991-1.4

vai alla scheda  
del libro

**N. COOK**

T  
C



EPC LIBRI

thomas telford



**N. COOK**

**Traduzione di Gianluca Barbella**

# **Guida all'Eurocodice 1**

## **Azioni del vento: EN 1991 - 1.4**



---

*Titolo originale: DESIGNERS' GUIDE TO EN 1991-1-4  
EUROCODE 1: ACTIONS ON STRUCTURES,  
GENERAL ACTIONS  
PART 1-4: WIND ACTIONS*

N. COOK

© The authors and Thomas Telford Limited 2007

---

**Guida all'Eurocodice 1**  
**Azioni del vento: EN 1991 - 1.4**  
ISBN 978-88-6310-270-3

Copyright © 2010 EPC S.r.l.  
Via dell'Acqua Traversa, 187/189 - 00135 Roma - [www.epc.it](http://www.epc.it)  
Servizio clienti: Tel. 06 33245277  
Redazione: Tel. 06 33245264/205 - Fax: 06 3313212

La EPC S.r.l. invita a consultare periodicamente il sito [www.epc.it](http://www.epc.it). Selezionando il **tasto aggiornamento libri e software** sarà possibile scaricare gli eventuali aggiornamenti dei volumi e dei software successivamente alla loro pubblicazione

Proprietà letteraria e tutti i diritti riservati alla EPC. La struttura e il contenuto del presente volume non possono essere riprodotti, neppure parzialmente, salvo espressa autorizzazione della Casa Editrice. Non ne è altresì consentita la memorizzazione su qualsiasi supporto (magnetico, magnetottico, ottico, fotocopie ecc.).

La Casa Editrice pur garantendo la massima cura nella preparazione del volume declina ogni responsabilità per possibili errori od omissioni, nonché per eventuali danni risultanti dall'uso dell'informazione ivi contenuta.

# Prefazione del Curatore della Collana

Gli Eurocodici Strutturali sono un insieme di Norme Europee (EN) per il progetto di edifici ed altre costruzioni di ingegneria civile e prodotti da costruzione, prodotto dal Comitato Europeo di Normazione (CEN). Essi includono le esperienze Nazionali ed il risultato della ricerca proveniente dall'intera Europa, insieme con la competenza degli esperti che li hanno sviluppati. Essi sono riconosciuti come l'insieme più tecnicamente avanzato di norme di ingegneria civile e strutturale a livello mondiale.

Gli Eurocodici coprono in modo completo tutti i principali materiali da costruzione (calcestruzzo, acciaio, legno, muratura e alluminio), tutti i principali campi della ingegneria strutturale (basi della progettazione strutturale, azioni, fuoco, geotecnica, sismica, ecc.) ed una vasta gamma di tipologie strutturali e di prodotto (edifici, ponti, torri e tralicci, silos, ecc). La pubblicazione delle parti degli Eurocodici è ora completa.

Lo scopo della Commissione Europea per lo sviluppo degli Eurocodici è che “*gli Eurocodici stabiliscano un insieme di regole tecniche comuni per il progetto di edifici e costruzioni di ingegneria civile che sostituiscano le differenti regole nei vari Stati Membri*”.

E' importante che i progettisti nella industria delle costruzioni siano pronti ad usarli. Per chi entra nella professione come laureato, il progetto con gli Eurocodici sarà la norma ed i datori di lavoro richiederanno che i loro nuovi assunti capiscano i più recenti approcci degli Eurocodici.

La collana *Designers' Guides to Eurocodes* della Thomas Telford è stata prodotta al fine di aiutare in questo processo e per promuovere e facilitare l'applicazione degli Eurocodici.

Questa collana dà una guida completa in forma di aiuti al progetto, indicazione delle procedure di progetto più adatte, ed esempi risolti. I libri includono anche approfondimenti per aiutare il progettista nella comprensione dei ragionamenti che stanno dietro l'oggetto delle norme. Tutte le guide individuali sono da usare congiuntamente con la *Guida all'Eurocodice - Principi generali di progettazione Strutturale: EN 1990*.

I testi forniscono una guida di buona qualità ed informazioni di approfondimento sugli Eurocodici. Esse sono in particolare dirette a queste categorie di utilizzatori o d'uso:

- I professionisti ingegneri strutturalisti/civili coinvolti nel progetto e nella costruzione di edifici e ponti.
- Il normatore.
- Il validatore ed il cliente o il suo rappresentante.

- Il produttore di prodotti da costruzione, dato che la Direttiva Europea sui Prodotti da Costruzione richiede l'uso degli Eurocodici.
- Per l'educazione universitaria, l'educazione *post lauream* e l'educazione permanente per il professionista.

Io vi raccomando queste guide.

**Prof. Haig Gulvanessian CBE**

Londra, Agosto 2010

# Prefazione del Curatore della versione italiana della Collana

La pubblicazione in italiano della collana *Designers' Guides to Eurocodes*, curata originariamente in lingua inglese dal Prof. Haig Gulvanessian per l'editore londinese Thomas Telford, braccio editoriale dell'ICE, *Institution of Civil Engineers*, è una occasione di aggiornamento culturale e professionale importantissima per varie ragioni, non solo legate alla grandissima autorevolezza degli Autori dei testi della collana stessa, molti dei quali direttamente coinvolti nella stesura degli Eurocodici, e quindi ben addentro alle singole ragioni che hanno portato a certe scelte e non altre.

In primo luogo le nostre ultime travagliate normative nazionali si sono ampiamente ispirate agli Eurocodici, tanto da costituirne in molti casi una copia (fedele o infedele, bella o brutta a seconda dei casi). Quindi in molti casi le domande che non trovano risposta nel testo delle NTC 2008 (e norme precedenti), trovano invece spesso più chiara risposta proprio nel testo degli Eurocodici. Dunque una serie di testi di estesa spiegazione degli Eurocodici è anche, indirettamente ma sostanzialmente, una estesa spiegazione delle attuali norme nazionali.

In secondo luogo, benché esistano in Italia testi che trattano anche degli Eurocodici, un po' a sorpresa non esiste ancora in Italia una collana veramente completa e coerente che tratti specificamente pressoché *tutti* gli Eurocodici (dallo 0 al 9) in modo organico ed esteso. Alcuni degli argomenti coperti dai testi che pubblicheremo non risulta siano mai stati oggetto di pubblicazioni specifiche in Italia. C'è dunque sicuramente bisogno di testi, di spiegazioni, di punti di vista differenti, e questa collana darà un contributo sostanziale, diretto a tutti coloro che hanno bisogno di informarsi sugli Eurocodici e sul senso delle norme di recente emissione.

In terzo luogo, senza voler essere esterofili per forza, la possibilità di leggere come affrontino certi problemi autorevoli esperti di Scuole molto diverse dalla nostra (e provenienti da tutta Europa) non può che essere un vero, grande arricchimento. La circolazione delle idee, anche magari differenti, non può che far bene e indurre, magari, a qualche utile riflessione. Certamente non potrà che giovare a tutti noi, esperti italiani, confrontarci con i metodi di calcolo, le idee, le considerazioni e riflessioni, le logiche e le pratiche tecniche e formali seguite negli altri Paesi europei, anche perché come detto la nostra stessa norma deriva in gran parte dagli Eurocodici.

La collana è stata tradotta da esperti Colleghi strutturisti che hanno spesso integrato il testo con note esplicative tese a chiarire il rapporto con le NTC 2008 e gli Allegati Nazionali italiani disponibili. In presenza di dubbi di interpretazione, in verità rari, sono direttamente stati sentiti gli Autori, con uno scambio proficuo di informazioni.

Confido dunque che i Colleghi italiani comprenderanno l'importanza di questa iniziativa e mi auguro che la troveranno molto utile, come è parsa a chi ha avuto l'idea di proporla in Italia.

**Paolo Rugarli**

Milano, Agosto 2010

## **AUTORE**

### **Nicholas John Cook, DSc(Eng), PhD(Eng), FREng, FStructE, FICE, CEng.**

Nicholas Cook è ingegnere del vento dal 1971: cominciando come ricercatore all'Università di Bristol; ha lavorato nel Building Research Establishment del Regno Unito dal 1973, diventando direttore del Gruppo di Geotecnica e Strutture nel 1990; entra in una società di consulenza privata nel 1995; Professore incaricato di Aerodinamica Industriale nel 1999; fonda nel 2001 la società di consulenza Anemos Associates, ora parte del gruppo RWDI.

È autore di circa 100 articoli nel campo dell'ingegneria del vento, nonché della guida *Designer's guide to wind loading of building structures*, e svariate guide alla progettazione per l'applicazione di normative.

La sua eminenza in questo campo è stata riconosciuta dalla nomina a membro della Royal Academy of Engineering nel 1998 e nel 2007 come primo destinatario della Davenport Medal, il maggiore riconoscimento dell'International Association of Wind Engineering.

Ha fatto parte dei gruppi di redazione di diversi British Standards e norme internazionali, tra cui la prima bozza della EN 1991-1-4. È tutt'ora membro del comitato di redazione dell'Allegato Nazionale per il Regno Unito.

## **TRADUTTORE**

### **Gianluca Barbella**

Nato a Brescia nel 1980, si è laureato in Ingegneria Civile con indirizzo strutturale presso l'Università degli Studi di Brescia, con una tesi sul comportamento dinamico di strutture sommerse ancorate da cavi. Ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Strutturale, Sismica e Geotecnica al Politecnico di Milano, sviluppando una innovativa procedura numerica per il calcolo della risposta di strutture snelle all'azione turbolenta del vento. È attualmente assegnista di ricerca al Dipartimento di Ingegneria Strutturale, dove si occupa di ingegneria del vento, di modellazione di tunnel sommersi e dove svolge esercitazioni per diversi corsi di Dinamica delle Strutture, Statica e Tecnica delle Costruzioni.

# Indice

## **Prefazione del Curatore della Collana**

### **Prefazione del Curatore della versione italiana della Collana**

<b>Premessa</b> .....	1
Intenti ed obiettivi di questa guida .....	1
Struttura di questa guida .....	1
Ringraziamenti .....	1

<b>Capitolo 1</b>	<b>Generalità</b> .....	3
	1.1 Oggetto .....	3
	1.2 Riferimenti normativi .....	6
	1.3 Ipotesi .....	6
	1.4 Distinzione tra principi e regole applicative .....	7
	1.5 Progettazione supportata da prove e misurazioni .....	9
	1.6 Definizioni .....	9
	1.6.1 Velocità base di riferimento del vento .....	9
	1.6.2 Velocità base del vento .....	10
	1.6.3 Velocità media del vento .....	10
	1.6.4 Coefficiente di pressione .....	10
	1.6.5 Coefficiente di forza .....	10
	1.6.6 Fattore di risposta quasi-statica .....	10
	1.6.7 Fattore di risposta in risonanza .....	11
	1.7 Simboli .....	11
<b>Capitolo 2</b>	<b>Situazioni di progetto</b> .....	13
	2.1 Situazioni persistenti .....	13
	2.2 Situazioni transitorie .....	14
	2.3 Situazioni eccezionali .....	14
	2.4 Fatica .....	16

<b>Capitolo 3</b>	<b>Modellazione delle azioni del vento</b> .....	17
3.1	Natura .....	17
3.2	Rappresentazione delle azioni del vento .....	18
3.3	Classificazione delle azioni del vento .....	18
3.4	Valori caratteristici .....	18
3.5	Modelli .....	19
<b>Capitolo 4</b>	<b>Velocità del vento e pressione cinetica</b> .....	21
4.1	Basi per il calcolo .....	21
4.2	Valori di base .....	22
4.2.1	Valore fondamentale della velocità base del vento .....	22
4.2.2	Velocità base del vento .....	24
4.3	Vento medio .....	26
4.3.1	Variazione con l'altezza .....	26
4.3.2	Rugosità del terreno .....	26
4.3.3	Orografia del terreno .....	31
4.3.4	Strutture adiacenti di grandi dimensioni e considerevole altezza .....	32
4.3.5	Edifici ravvicinati e ostacoli .....	32
4.4	Turbolenza del vento .....	33
4.5	Pressione cinetica di picco .....	36
<b>Capitolo 5</b>	<b>Azioni del vento</b> .....	41
5.1	Generalità .....	41
5.2	Pressioni del vento sulle superfici .....	42
5.3	Forze del vento .....	42
<b>Capitolo 6</b>	<b>Fattore strutturale <math>c_s c_d</math></b> .....	45
6.1	Generalità .....	45
6.2	Determinazione di $c_s c_d$ .....	46
6.3	Procedura dettagliata .....	47
6.3.1	Fattore strutturale $c_s c_d$ .....	47
6.3.2	Valutazioni di funzionalità .....	48
6.3.3	Vibrazione indotta dalla turbolenza di scia .....	49
<b>Capitolo 7</b>	<b>Coefficienti di pressione e forza</b> .....	51
7.1	Generalità .....	52
7.1.1	Scelta dei coefficienti aerodinamici .....	52
7.1.2	Pressioni e forze asimmetriche e contrapposte .....	52
7.1.3	Effetto di ghiaccio e neve .....	53

7.2	Coefficienti di pressione per edifici .....	53
7.2.1	Generalità .....	53
7.2.2	Pareti verticali di edifici a pianta rettangolare .....	55
7.2.3	Coperture piane .....	57
7.2.4	Coperture a semplice falda .....	58
7.2.5	Coperture a doppia falda .....	58
7.2.6	Coperture a padiglione .....	58
7.2.7	Coperture a più campate .....	58
7.2.8	Coperture a volta e cupole .....	59
7.2.9	Pressione interna .....	59
7.2.10	Pressioni su pareti e coperture con più di uno strato .....	62
7.3	Coperture a tettoia .....	64
7.4	Muri isolati, parapetti, recinzioni e insegne .....	65
7.4.1	Muri isolati e parapetti .....	65
7.4.2	Fattori di schermatura per muri e recinzioni .....	66
7.4.3	Insegne .....	67
7.5	Coefficienti d'attrito .....	67
7.6	Elementi strutturali con sezione rettangolare.....	69
7.7	Elementi strutturali con sezione a spigoli vivi.....	70
7.8	Elementi strutturali con sezione poligonale .....	70
7.9	Cilindri circolari .....	71
7.9.1	Coefficienti di pressione esterna .....	71
7.9.2	Coefficienti di forza .....	71
7.9.3	Coefficienti di forza per cilindri verticali disposti in fila .....	72
7.10	Sfere .....	72
7.11	Strutture a traliccio e ponteggi.....	72
7.12	Bandiere .....	73
7.13	Snellezza effettiva $\lambda$ e fattore di effetto estremità $\psi_\lambda$ .....	73
<b>Capitolo 8</b>	<b>Azioni del vento sui ponti .....</b>	<b>75</b>
8.1	Generalità.....	75
8.2	Scelta della procedura di calcolo della risposta.....	76
8.3	Coefficienti di forza .....	77
8.3.1	Coefficienti di forza in direzione x – metodo generale .....	77
8.3.2	Forza in direzione x – metodo semplificato .....	79
8.3.3	Forze del vento sugli impalcati in direzione z .....	79
8.3.4	Forze del vento sugli impalcati in direzione y .....	79
8.4	Pile del ponte .....	80
8.4.1	Direzioni del vento e situazioni di progetto .....	80

8.4.2	Effetti del vento sulle pile .....	80
<b>Capitolo 9</b>	<b>Allegati</b> .....	<b>83</b>
9.1	Commenti generali .....	83
9.2	Allegato A Effetti del terreno .....	83
9.2.1	A.1 Illustrazione della rugosità massima per ogni categoria di terreno ....	84
9.2.2	A.2 Transizione tra le Categorie di rugosità 0, I, II, III e IV .....	84
9.2.3	A.3 Calcolo numerico dei coefficienti di orografia .....	85
9.2.4	A.4 Strutture limitrofe .....	86
9.2.5	A.5 Altezza di traslazione .....	86
9.3	Allegato B Procedura 1 per il calcolo del fattore strutturale $c_s c_d$ .....	86
9.4	Allegato C Procedura 2 per il calcolo del fattore strutturale $c_s c_d$ .....	87
9.5	Allegato D Valori di $c_s c_d$ per diversi tipi di strutture .....	87
9.6	Allegato E Distacco di vortici ed instabilità aerodinamiche .....	88
9.6.1	E.1 Distacco di vortici .....	88
9.6.2	E.2 Galoppo .....	89
9.6.3	E.3 Galoppo da interferenza .....	89
9.6.4	E.4 Divergenza e flutter .....	90
9.7	Allegato F Caratteristiche dinamiche delle strutture .....	90
9.7.1	F.1 Generalità .....	90
9.7.2	F.2 Frequenza fondamentale .....	90
9.7.3	F.3 Forma del modo fondamentale .....	91
9.7.4	F.4 Massa equivalente .....	92
9.7.5	F.4 Decremento logaritmico dello smorzamento .....	92
	<b>Riferimenti</b> .....	<b>93</b>
	<b>Post scriptum</b> .....	<b>95</b>
	<b>Indice analitico</b> .....	<b>99</b>

# Premessa

EN 1991-1-4 <sup>(1)</sup>, *Eurocodice 1: Azioni sulle Strutture – Azioni Generali – Parte 1–4: Azioni del Vento*, è la normativa principale per le azioni del vento sulle strutture e descrive i principi e i requisiti per il calcolo dei carichi eolici di progetto. Tale normativa è conforme con i requisiti dell'Eurocodice EN 1990, *Eurocodice: Criteri Generali di Progettazione Strutturale*, e fornisce le azioni del vento necessarie all'applicazione degli Eurocodici per la progettazione strutturale dal 2 al 9.

## Intenti ed obiettivi di questa guida

Lo scopo principale di questo volume è di fornire all'utente una guida per l'interpretazione e l'uso della EN 1991, *Eurocodice 1: Azioni sulle Strutture – Azioni Generali – Parte 1–4: Azioni del Vento*, e delle modifiche previste che saranno introdotte dai relativi Allegati Nazionali <sup>(2)</sup>. In particolare, sono stati aggiunti commenti in riferimento alle modifiche introdotte nell'Allegato Nazionale del Regno Unito <sup>(3)</sup>. Alcune delle rimanenti questioni relative al UK NAD <sup>(4)</sup> saranno eventualmente chiarite prima della pubblicazione.

## Struttura di questa guida

La EN 1991-1-4 ha una prefazione, otto sezioni e sei allegati. I capitoli dall'1 all'8 di questa guida corrispondono alle otto sezioni della EN 1991-1-4. La sequenza di numerazione di questi capitoli rispecchia i numeri delle sezioni della EN. Il Capitolo 9 corrisponde invece ai sei allegati. Inoltre, i numeri delle sezioni pertinenti della EN 1991-1-4 e dello UK NA sono indicati a margine dei commenti corrispondenti.

Le parti di testo direttamente riportate dalla EN sono in carattere corsivo. Formule e figure riprese dalla EN mantengono la loro numerazione. Formule e figure dell'autore, ove numerate, hanno numeri preceduti dalla lettera D (da Designers' Guide <sup>(5)</sup>); ad esempio, equazione (D4.1) nel Capitolo 4.

## Ringraziamenti

La realizzazione di questa guida non sarebbe stata possibile senza le analisi e le correzioni alla EN 1991-1-4 messe a punto dagli altri membri del comitato di redazione

- 
1. [N.d.T.: EN = (European Norm) Normativa Europea.]
  2. [N.d.T.: NA = (National Annex) Allegato Nazionale.]
  3. [N.d.T.: nel prosieguo UK NA. Per quanto riguarda l'Allegato Nazionale italiano sono stati indicati nelle Note del Traduttore i punti in cui le scelte operate sono diverse da quelle raccomandate dalla EN 1991-1-4.]
  4. [N.d.T.: NAD = (National Application Document) Documento di Applicazione Nazionale.]
  5. [N.d.T.: Guida dei Progettisti.]

del UK NAD, che hanno generosamente messo a disposizione il loro tempo e la loro esperienza collaborando con l'Istituto Britannico per gli Standard per l'applicazione degli Eurocodici nel Regno Unito.

## CAPITOLO 4

# Velocità del vento e pressione cinetica

In questo capitolo viene descritto il calcolo dei valori di progetto della velocità del vento e della corrispondente pressione cinetica per qualsiasi località geografica ed esposizione del sito. Il contenuto di questo capitolo è trattato nella *Sezione 4*, suddiviso come segue:

- Basi per il calcolo *Paragrafo 4.1*
- Valori di base *Paragrafo 4.2*
- Vento medio *Paragrafo 4.3*
- Turbolenza del vento *Paragrafo 4.4*
- Pressione cinetica di picco *Paragrafo 4.5*

### 4.1. Basi per il calcolo

Il modello del fattore di picco viene usato nella EN 1991-1-4 come base per il calcolo. **Par. 4.1(1)**  
Il principio di questo modello consiste nella possibilità di suddividere il carico quasi-statico di raffica massimo o la risposta dinamica della struttura in una parte media statica, ed una parte turbolenta non statica. La proporzione del contributo turbolento è espressa da un fattore di picco,  $g$ , che, per quanto concerne i carichi di raffica, dipende dalle dimensioni di quest'ultima e, per la dinamica, dalle caratteristiche della struttura. Dunque, per la massima velocità di raffica  $\hat{v}(z)$ , si ha:

$$\hat{v}(z) = v_m(z) + g(t) \cdot \sigma_v(z) = v_m(z) \cdot [1 + g(t) \cdot I_v(z)] \quad (D4.1)$$

dove  $v_m(z)$  è la velocità media alla quota  $z$ ,  $g(t)$  è il fattore di picco associato alla durata  $t$ ,  $\sigma_v(z)$  è la deviazione standard della turbolenza e  $I_v(z) = \sigma_v(z)/v_m(z)$  è l'intensità di turbolenza. La risposta dinamica della struttura è ottenuta applicando un fattore di risposta in risonanza alla componente turbolenta.

Questo modello è alla base del calcolo nella maggior parte dei codici in tutto il mondo, ed il suo sviluppo e promozione verso questa posizione dominante vanno attribuiti a Davenport [9]. Quando i dati vengono derivati tramite metodi di analisi del valor estremo più sofisticati, i valori risultanti sono spesso espressi in questo formato per conformità, come per il metodo Cook-Mayne [10,11], che è alla base di molti dei

coefficienti di pressione nella EN 1991-4, nonché nella BS 6399-2 [1], normativa corrente nel Regno Unito, e altre normative in tutto il mondo.

A causa della relazione quadratica tra la velocità del vento e la pressione, la relazione lineare per la velocità massima corrisponde ad una espressione quadratica per il carico massimo del vento della forma:

$$\hat{F}_w = \bar{F}_w \cdot [1 + g(t) \cdot I_v(z)]^2 = \bar{F}_w \cdot [1 + 2 \cdot g(t) \cdot I_v(z) + g^2(t) \cdot I_v^2(z)] \quad (D4.2)$$

L'equazione (D4.2), data la sua non-linearità, è scomoda da trattare per il calcolo della risposta dinamica, pertanto viene generalmente linearizzata come:

$$\hat{F}_w \approx \bar{F}_w \cdot [1 + 2 \cdot g(t) \cdot I_v(z)] \quad (D4.3)$$

eliminando l'ultimo termine quadratico nell'equazione (D4.2). Questo è ragionevole quando l'intensità di turbolenza  $I_v(z)$  è piccola, cioè in sommità di edifici alti, dove  $I_v(z) \sim 0,1$ , mentre il termine scartato  $g^2(t) \cdot I_v^2(z)$  diviene significativo in prossimità del suolo in aree urbane, dove  $I_v(z) \sim 0,3$ .

La EN 1991-1-4 adotta la forma linearizzata dell'equazione (D4.3) nelle procedure raccomandate per il calcolo dei carichi quasi-statici di picco e della risposta dinamica.

**UK NA 2.17** L'Allegato Nazionale del Regno Unito per i carichi di picco usa invece la relazione completa (D4.2) al fine di mantenere un fattore di sicurezza adeguato per edifici bassi in aree urbane. Altri Allegati Nazionali possono adottare la forma lineare ma in tal caso vengono introdotti effetti di compensazione – aumentando ad esempio il fattore di picco  $g(t)$ , impostando  $h_{dis} = 0$  (si vedano le Sezioni 4.3.2 e 4.3.5 di seguito) o scegliendo un diverso fattore di turbolenza  $k_T$  (Sezione 4.4) – dunque è importante che il progettista segua in toto le indicazioni definite dagli Allegati Nazionali in uso.

**Importante**

## 4.2. Valori di base

### 4.2.1. Valore fondamentale della velocità base del vento

**Par. 4.2(1)P** Il valore fondamentale della velocità base del vento  $v_{b,0}$  è definito come la velocità media del vento su un intervallo di 10 minuti con un rischio annuale di eccedenza di 0,02, indipendentemente dalla direzione e dalla stagione, a 10 m dal suolo in un terreno di Categoria II.

Un terreno di Categoria II è definito come campagna aperta con poca vegetazione e ostacoli isolati ad una distanza reciproca di almeno 20 volte la loro altezza. Questo corrisponde approssimativamente all'esposizione di riferimento per anemometri dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale. La EN 1991-1-4 assegna un valore di rugosità aerodinamica  $z_0 = 0,05$  m a terreni di Categoria II, mentre la Normativa Britannica BS 6399-2 [1] assegna allo stesso terreno il valore  $z_0 = 0,03$  m. Questa differenza di definizione tra le rugosità di riferimento non è significativa purché tutti i parametri per le altre categorie di terreno siano derivati usando lo stesso dato.

La media temporale su un intervallo di 10 minuti è lo standard meteorologico in gran parte dell'Europa continentale, ma alcuni stati utilizzano un periodo di un'ora, tra cui il Regno Unito e la Germania. Questi ultimi, sulla base di calibrazioni empiriche,

hanno adottato un fattore di 1,06 per allineare i dati sperimentali mediati su un'ora ad un periodo di 10 minuti.

I valori della velocità base del vento  $v_{b,0}$  vengono forniti per ciascuno Stato Membro dal corrispondente Allegato nazionale. Lo UK NA riporta i valori in una mappa (Figura NA.1) riferita al livello del mare, definendo questi come valori di 'mappa',  $v_{b,map}$ , e introduce un fattore di altitudine  $c_{alt}$  per riportare i valori alla quota di base richiesta: <sup>(1)</sup>

UK NA 2.4

Par. 4.2(2)P

Nota 1

$$v_{b,0} = v_{b,map} \cdot c_{alt} \quad (D4.4)$$

La mappa nello UK NA è molto simile a quella nella BS 6399-2 [1] con la differenza che la base di dati è stata portata da 11 a 30 anni e i valori di media oraria sono stati amplificati di 1,06 per rappresentare le medie su 10 minuti.

I valori riportati nelle mappe del Regno Unito non sono direttamente confrontabili con i valori degli stati confinanti, la Francia in particolare, a causa di diverse scelte relative alle regole applicative assunte nei rispettivi Allegati Nazionali. In particolare, la Francia preferisce includere gli effetti di altitudine e rugosità all'interno delle mappe, mentre il Regno Unito li rimuove dalle mappe e li considera nelle regole applicative. Per questo motivo i valori delle mappe francesi sono maggiori di quelli delle coste britanniche corrispondenti, ad esempio il valore per Calais è significativamente più elevato di quello per Dover. Ma quando vengono usate le rispettive regole applicative, si ha una buona corrispondenza dei valori di progetto risultanti.

L'eliminazione degli effetti di rugosità dalla mappa del Regno Unito e la loro reintroduzione nelle regole applicative può sembrare sveniente, ma in realtà non è così. Circa un terzo della variazione di velocità del vento da 'mare' a 'campagna' avviene nel primo chilometro dalla costa, un altro terzo tra 1 km e 10 km e l'ultimo terzo tra 10 km e 100 km. Dato che il Regno Unito è un'isola, la distanza dalla costa sopravvento dipende dalla direzione del vento, laddove altri Stati Membri hanno al più una sola linea di costa. In base a ciò, i valori elevati lungo la costa atlantica francese decrescono verso l'entroterra più velocemente di quanto non sia mostrato nella mappa francese, ma questo divario è conservativo.

Il fattore di altitudine per il Regno Unito è:

UK NA 2.5

$$c_{alt} = 1 + 0,01 \cdot A \quad \text{per } z \leq 10 \text{ m} \quad (D4.5a)$$

$$c_{alt} = 1 + 0,01 \cdot A \cdot (10/z)^{0,2} \quad \text{per } z > 10 \text{ m} \quad (D4.5b)$$

dove  $A$  è l'altitudine sul livello del mare quando l'orografia non è significativa, o l'altitudine della base sopravvento del rilievo in caso contrario, e  $z = z_s$ , come indicato in *Figura 6.1* nella EN, o l'altezza dal suolo della parte fuori terra in *Figura 7.4* nella EN. Il fattore di altitudine per il Regno Unito è lo stesso fattore empirico usato nella BS 6399-2 [1] per gli edifici, con la differenza che ora il valore decresce con l'altezza dal suolo per tener conto di strutture più alte, come le antenne di comunicazione.

1. [N.d.T.: l'Allegato Nazionale italiano adotta un approccio simile a quello per il Regno Unito, ma al posto del fattore di altitudine definisce un termine aggiuntivo che tiene conto della quota sul livello del mare. Tale approccio è adottato anche nelle NTC 2008. Nelle CNR-DT 207/2008 viene definito un coefficiente di altitudine che fornisce comunque gli stessi valori di velocità del vento dell'Allegato Nazionale italiano.]

L'introduzione di questo fattore riduce considerevolmente il numero di siti per i quali è necessario applicare le regole per orografie complesse, come mostrato in Figura D4.1, cioè solo nella metà più alta di una collina o vicino alla sommità di un pendio.

L'altitudine  $A$  è quella del sito quando l'orografia non è significativa e alla base del rilievo quando è significativa – la stessa regola usata nella BS 6399-2 [1].

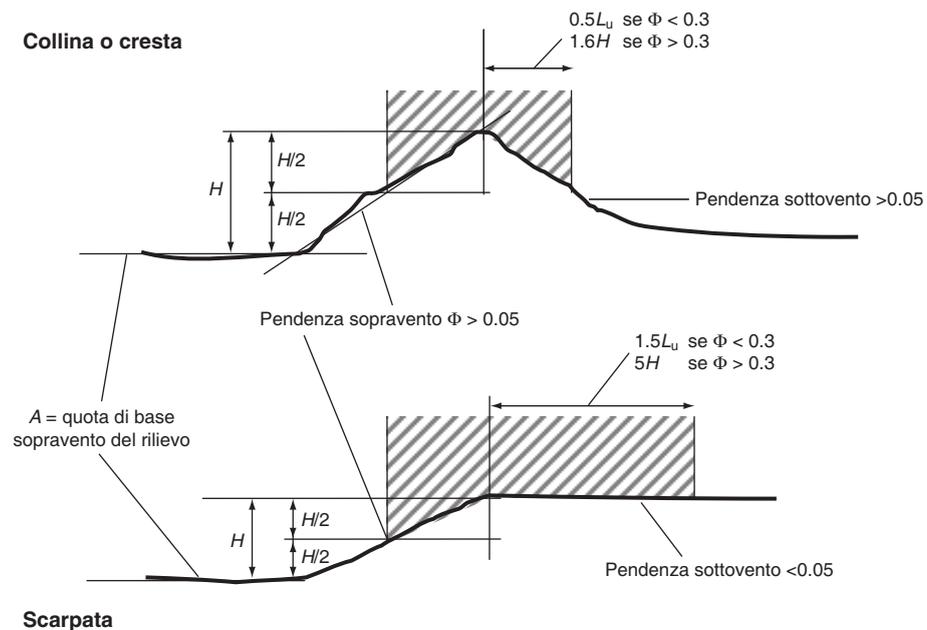


Fig. D4.1 - Regole per il Regno Unito in caso di orografia significativa

#### 4.2.2. Velocità base del vento

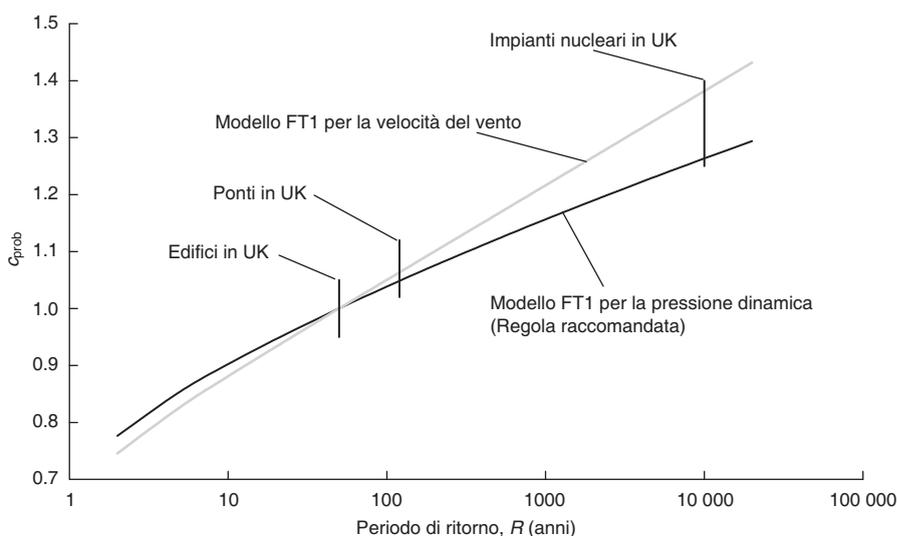
**Par. 4.2(2)P** La velocità base del vento  $v_b$  è il valore di riferimento  $v_{b,0}$  dopo l'applicazione dei fattori direzionale e stagionale  $c_{dir}$  e  $c_{season}$ . Il valore raccomandato per entrambi è 1,0, **UK NA 2.6** ma la EN ammette la possibilità di introdurre Valori Nazionali. Lo **UK NA** sfrutta questa possibilità, fornendo tabelle invariate rispetto alla BS 6399-2 [1]. Sebbene si possa pensare di applicare i fattori per il Regno Unito anche lungo le coste atlantiche di Francia, Belgio e Olanda, questo non deve essere fatto poiché è necessario attenersi agli Allegati Nazionali degli Stati Membri corrispondenti.

**Par. 4.2(2)P** Lo **UK NA** fornisce valori per il fattore direzionale  $c_{dir}$  con incrementi dell'angolo di direzione di 30° e ammette interpolazioni per gli angoli intermedi. Questi valori sono **Nota 2** gli stessi della BS 6399-2 [1]. I carichi del vento su qualsiasi singola struttura sono valutati per 'casi ortogonali' in quanto la EN fornisce i coefficienti di pressione solo per questi casi (si veda il Capitolo 5), mentre la BS 6399-2 prevede coefficienti direzionali con un passo di 30°. Di conseguenza, il fattore appropriato per ogni caso ortogonale è il valore più elevato che si ha in un cono di  $\pm 45^\circ$  dalla direzione normale relativa al caso considerato. **UK NA 2.6**

**Par. 4.2(2)P** Lo **UK NA** fornisce valori per il fattore stagionale  $c_{season}$  per ogni possibile periodo di uno, due o quattro mesi durante l'anno, nonché per i sei mesi relativi ai periodi di estate e inverno. Questi valori sono gli stessi della BS 6399-2 [1]. Lo scopo principale del fattore **Nota 3** **UK NA 2.7**

stagionale è la valutazione dei carichi del vento su strutture temporanee e su strutture durante la costruzione. Il *Paragrafo 4.2(3)* proibisce esplicitamente l'uso del fattore stagionale per 'strutture mobili che possono essere usate in ogni periodo dell'anno'. L'importanza della raccomandazione sta nelle parole 'che possono essere usate in ogni periodo dell'anno', che implicano una mancanza di controllo sul periodo di esposizione. Tuttavia, se l'uso di una struttura mobile è temporaneo, ad es. una gru a torre montata e utilizzata in uno specifico periodo, il fattore stagionale può essere usato.

**Par. 4.2(3)**



**Fig. D4.2** - Modelli per il fattore di probabilità

Una nota relativa al *Paragrafo 4.2(2)P* permette l'uso di un fattore di probabilità  $c_{prob}$  per modificare il rischio annuale di superamento nell'espressione (4.2). Lo UK NA adotta i valori raccomandati di  $K = 0,2$  e  $n = 0,5$ , che corrisponde ad una distribuzione Fisher-Tippett Tipo 1 (FT1) per la pressione dinamica, così che il fattore di probabilità  $c_{prob}$  per il Regno Unito è uguale alla quantità  $S_p$  definita dalla BS 6399-2 [1]. Altri Stati Membri possono scegliere di adottare la distribuzione FT1 per la velocità del vento, nel quale caso  $K = 0,1$  e  $n = 1$  (2). Questi due modelli per il fattore di probabilità  $c_{prob}$  sono mostrati in Figura D4.2 in funzione del periodo di ritorno  $R$  con  $R \approx 1/p$ , cioè un periodo di ritorno  $R$  di 50 anni corrisponde ad un rischio annuale di superamento  $p = 0,02$ . Nel Regno Unito per strutture comuni come edifici o ponti, la differenza tra i due modelli è piccola, ma per installazioni nucleari tale differenza è significativa.

**Par. 4.2(2)P**

**Nota 4**

**UK NA 2.8**

Prima del 1995 la prassi nel Regno Unito era di utilizzare il modello FT1 per la velocità del vento, ma sia la teoria che le osservazioni hanno mostrato che l'approccio più appropriato è il modello FT1 per la pressione dinamica, usato in gran parte d'Europa.

2. [N.d.T.: l'Allegato Nazionale italiano adotta i valori  $K = 0,14$  e  $n = 1$ . Nelle NTC 2008 si adotta lo stesso coefficiente raccomandato dalla EN (espressione (C3.3.2)). Nelle CNR-DT 207/2008 si definisce un coefficiente di ritorno  $c_r$  che di fatto è un involuppo dei coefficienti ottenuti con i valori di  $K$  e  $n$  raccomandati nella EN e quelli invece dati nell'Allegato Nazionale italiano.]

## 4.3. Vento medio

### 4.3.1. Variazione con l'altezza

**Par. 4.3.1(I)** La velocità media del vento  $v_m(z)$  è principalmente una funzione dell'altezza, tramite gli effetti della rugosità del terreno e dell'orografia. Essa è ottenuta moltiplicando la velocità base del vento  $v_b$  per il fattore di rugosità  $c_r(z)$  e per il fattore di orografia <sup>(3)</sup>  $c_o(z)$ . L'affermazione che  $c_o(z) = 1$  'a meno che diversamente specificato al Paragrafo

**Par. 4.3.1(I)** 4.3.3' è fuorviante in quanto implica che questo sia il caso tipico. Ciò nonostante il Paragrafo 4.3.3 specifica che vanno considerati rilievi con pendenze superiori di 3° (5%, o 1:20), il che si verifica piuttosto spesso.

**UK NA 2.5** Lo UK NA adotta la soglia di pendenza del 5%, ma limita il calcolo di  $c_o(z)$  ai siti in prossimità della sommità di colline o di pendii, cioè i siti compresi nelle zone tratteggiate mostrate in Figura NA2 (Figura D4.1).

### 4.3.2. Rugosità del terreno

**Par. 4.3.2(I)** Il fattore di rugosità  $c_r(z)$  tiene conto dell'effetto della rugosità della superficie del terreno sul profilo verticale della velocità del vento. Secondo la teoria dello strato limite il profilo appropriato della velocità media del vento ha la forma:

$$v_m(z) = 2,5 \cdot u_* \cdot \left[ \frac{\ln\left(\frac{z-h_{dis}}{z_0}\right) + 5,75 \cdot \left(\frac{z-h_{dis}}{z_g}\right) - 1,875 \cdot \left(\frac{z-h_{dis}}{z_g}\right)^2}{-\frac{4}{3} \cdot \left(\frac{z-h_{dis}}{z_g}\right)^3 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{z-h_{dis}}{z_g}\right)^4} \right] \quad (D4.6)$$

in cui  $u_*$  è la velocità d'attrito e  $z_g$  è l'altezza geostrofica dello strato limite. L'altezza geostrofica è elevata in caso di venti intensi causati da aree depressionarie in zone temperate,  $z_g \approx 2000$  m, in questo modo in prossimità del suolo solo il primo termine logaritmico è significativo. Il parametro opzionale  $h_{dis}$  è l'altezza di traslazione, <sup>(4)</sup> descritto più avanti nella Sezione 4.3.5.

**Importante** Si noti che l'equazione (D4.6) non si applica in caso di venti generati da fenomeni meteorologici differenti, quali violente correnti convettive discendenti (downburst), venti catabatici, tornado o uragani. Ove sia necessario, gli Allegati Nazionali includeranno eventuali regole specifiche per gli Stati Membri soggetti a tali fenomeni meteorologici. Le informazioni fornite dalla EN 1991-1-4 non sono direttamente applicabili in altri paesi nei quali i principali venti intensi non siano generati da aree depressionarie in zone temperate.

La EN semplifica il profilo di velocità al primo termine logaritmico, dunque  $c_r(z)$  diventa:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z-h_{dis}}{z_0}\right) \quad (D4.7)$$

3. [N.d.T.: anche 'coefficiente topografico' o 'coefficiente di topografia'.]

4. [N.d.T.: nel testo originale 'displacement height'.]

che è l'espressione (4.4) della EN, dove  $k_r = 2,5 \cdot u_* / v_b$  è un fattore di terreno, definito dall'espressione (4.5). La EN inoltre limita l'altezza minima dal suolo a  $z_{\min}$ , in funzione della rugosità del terreno, e l'altezza massima a  $z_{\max} = 200$  m. I valori raccomandati per  $z_0$  e  $z_{\min}$  sono tabulati per ogni categoria di terreno (Tabella 4.1 nella EN).

L'equazione (D4.7) differisce dall'espressione (4.4) per la presenza dell'altezza di traslazione  $h_{\text{dis}}$  che è definita nella EN come Valore Nazionale (Si veda la Sezione 4.3.5 per la definizione di  $h_{\text{dis}}$ ). Il metodo raccomandato dalla EN non utilizza il parametro  $h_{\text{dis}}$ , che dunque non viene incluso in nessuna espressione. Questo è solo uno dei diversi inconvenienti della EN, tanto che un osservatore cinico potrebbe pensare siano stati deliberatamente introdotti per ostacolare modifiche legittime da parte degli NA. Dato che lo UK NA sceglie di applicare  $h_{\text{dis}}$ , tutte le equazioni in questa Guida includono dove appropriato tale parametro.

La Figura D4.3 confronta, per la rugosità di riferimento  $z_0 = 0,05$  m, il modello completo dell'equazione (D4.6), usato nella BS 6399-2 [1], con il modello semplificato (D4.7) della EN e con il modello basato su 'legge di potenza' comunemente usato al di fuori dell'Europa. Il modello basato su 'legge logaritmica' è affidabile vicino al suolo, ma diventa sempre meno conservativo al di sopra di circa 100 m, mentre il modello con 'legge di potenza' usato in alcuni precedenti codici di buona pratica<sup>(5)</sup> rimane affidabile anche a quote superiori.

Un avvertimento nella EN afferma che l'espressione (4.4) è valida 'quando la distanza sopravento con rugosità di terreno uniforme è in grado di stabilizzare sufficientemente il profilo'. Il valore raccomandato per l'ampiezza del settore di terreno con rugosità uniforme, definito nella Figura 4.1 della EN, è  $\pm 15^\circ$  ambo i lati rispetto alla direzione del vento, ma la scelta della 'distanza sopravento' è lasciata agli NA.

Par. 4.3.2(2)

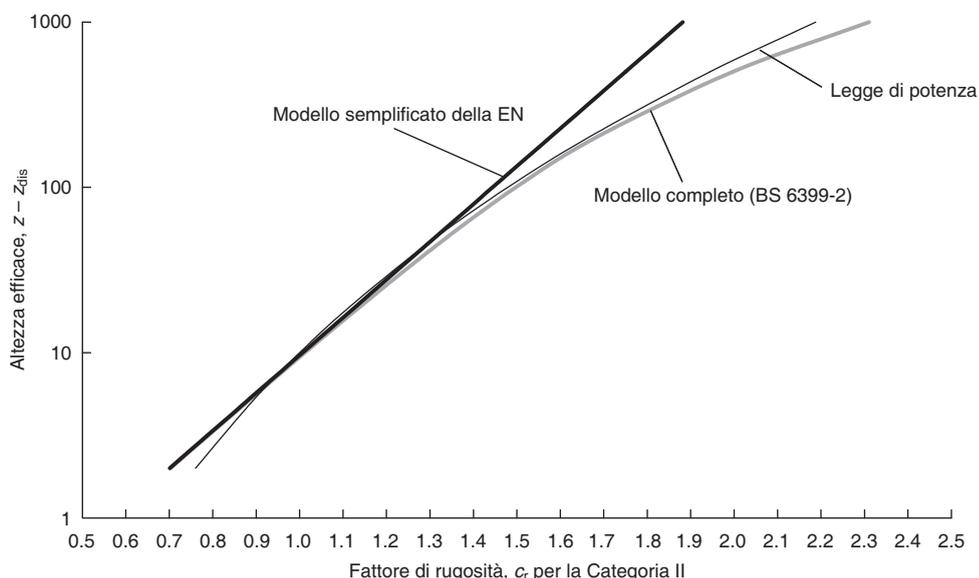
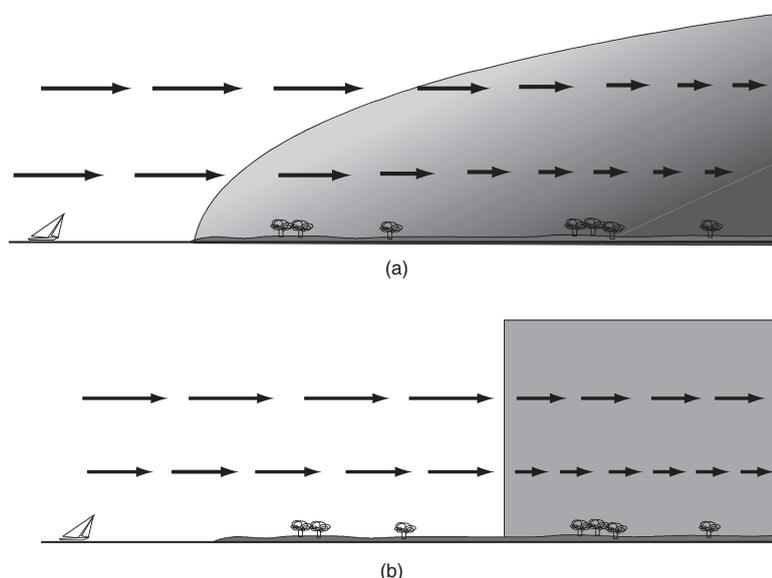


Fig. D4.3 - Modelli per il fattore di rugosità  $c_r(z)$

5. [N.d.T.: il termine originale è 'code of practice' con il quale si indica un insieme di norme e metodologie di buona pratica progettuale che non hanno però valore cogente, cioè non hanno valore di legge, come ad esempio in Italia le NTC 2008 (emanate attraverso Decreto Ministeriale).]



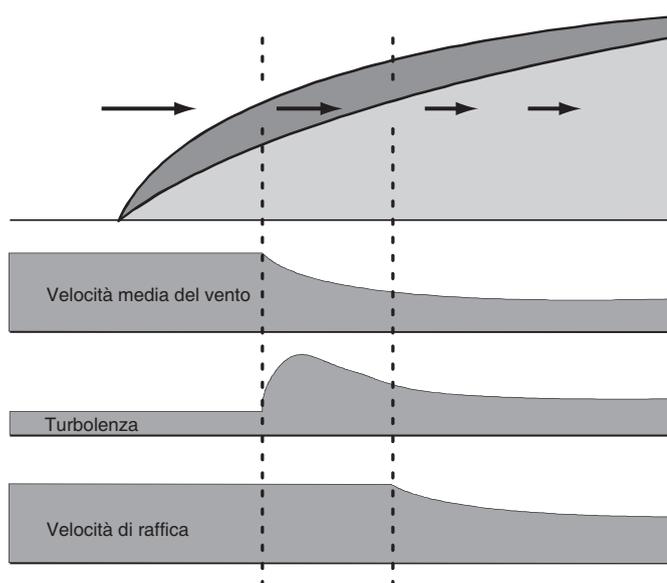
**Fig. D4.4** - Risposta dello strato limite atmosferico ad un cambio di rugosità del suolo: (a) comportamento reale; (b) modello raccomandato nella EN 1991-1-4

Il reale andamento del campo di vento dovuto ad un cambio della rugosità superficiale è illustrato in Figura D4.4(a) per un vento da mare, cioè un cambio da mare a terra. Il vento che soffia sul mare è caratterizzato da una grande distanza, o 'fetch', sulla quale si genera un profilo di equilibrio, in cui gli sforzi turbolenti bilanciano l'attrito superficiale. Dopo aver superato la linea di costa, l'incremento di attrito superficiale provoca un rallentamento della velocità del vento vicino al suolo fino a che viene raggiunto un nuovo stato di equilibrio. Questo effetto si propaga gradualmente nello strato limite verso l'alto, in questo modo la velocità del vento a quote superiori non risente di questo rallentamento se non ad una certa distanza sottovento dalla costa.

Le normative spesso semplificano questo fenomeno assumendo che non vi sia alcun effetto fino ad una certa distanza dalla costa, oltre la quale valgono subito le nuove condizioni di equilibrio, come mostrato in Figura D4.4(b). Questa semplificazione è adottata dal metodo raccomandato della EN 1991-1-4, come anche dal 'Metodo Standard' della BS 6399-2 [1]. Se si considera la transizione mare-terra, tale semplificazione è molto buona per la gran parte dell'Europa continentale distante dal mare, dove gli effetti sono limitati. Essa è abbastanza buona anche per quei paesi con una singola linea di costa, dove gli errori del modello possono essere compensati dalla determinazione della velocità base del vento. Tuttavia, la situazione è differente per il Regno Unito che, essendo una piccola isola, possiede linee di costa a distanze diverse in ogni direzione: siti vicini alle coste occidentali saranno soggetti a venti occidentali più intensi di quanto atteso per la rugosità di riferimento, mentre siti vicini alle coste orientali saranno soggetti a venti orientali più intensi.

Lo stesso effetto si ha per una transizione da terreno rurale, o 'campagna aperta', a suolo urbano, o 'città', ma in questo caso la maggiore intensità di turbolenza associata a quest'ultimo può avere effetti significativi sulla risposta dinamica di edifici alti vicini ai confini della città. La Figura D4.5 riporta un dettaglio della zona di transizione in

corrispondenza del cambio di rugosità, in cui si nota lo spessore significativo di tale zona. L'energia cinetica associata alla velocità media del vento viene convertita in turbolenza per poi essere trasferita tramite gli sforzi di Reynolds alla superficie del terreno, questo processo di dissipazione richiede un certo tempo per compiersi. In Figura D4.5 si osserva che la velocità media del vento comincia a decrescere all'inizio della zona di transizione, mentre la velocità di raffica non decresce se non oltre il limite della zona di transizione. All'interno di quest'ultima, l'intensità di turbolenza cresce inizialmente fino ad un valore massimo per poi assestarsi al nuovo valore di equilibrio. Ne consegue che gli edifici in prossimità del limite dell'area urbana saranno soggetti a valori di raffica simili a quelli in aperta campagna, ma con maggiori livelli di turbolenza portando ad una risposta dinamica amplificata.



**Fig. D4.5** - Effetti di transizione tra terreni con diversa rugosità

Il processo di progettazione per edifici a pianta rettangolare viene spesso ricondotto a quattro casi ortogonali, o anche meno per strutture simmetriche. Ciascun caso ortogonale implica un arco di angoli di direzione del vento di 90°, cioè tre volte l'ampiezza raccomandata. Di conseguenza, i *Paragrafi 4.3.2(3)* e *(4)* richiedono all'utente di utilizzare la rugosità inferiore relativa ad ogni possibile settore di 30° all'interno dell'arco considerato.

**Par. 4.3.2(3)**

**Par. 4.3.2(4)**

**UK NA 2.12**

Mentre ci si aspetta che la maggior parte dei paesi definiscano una 'distanza sopravento' di pochi chilometri, lo UK NA definisce una distanza di 100 km e fornisce un metodo per tener conto di tutti i valori intermedi. L'applicazione è semplificata combinando alcune categorie di terreno:

**UK NA 2.11**

- La Categoria di terreno 0 è denominata 'Mare'.
- Le Categorie di terreno I e II sono considerate insieme e sono denominate 'Campagna'.
- Le Categorie di terreno III e IV sono considerate insieme e sono denominate 'Città'.