

ISSN n° 0010-9673 Poste Italiane SpA - Spedizione in Abbonamento Postale - D.L. 353/2003 (con. in L. 27.02.04 n° 46) Art. 1, comma 1, L.O./M. Prezzo a copiar. € 15,00 - In caso di mancato ricevimento inviare al CMP di Milano-Roseo per la restituzione al mittente previo pagamento reso



LUG/AGO 2024



RIVISTA BIMESTRALE
PER LA DIFFUSIONE
DELLA CULTURA DELL'ACCIAIO

COSTRUZIONI METALLICHE

COSTRUZIONI METALLICHE - FONDATA NEL 1949

REDAZIONE

DIRETTORE RESPONSABILE: BRUNO FINZI

EDITOR IN CAPO: ELIDE NASTRI Università di Salerno, Italia

COMITATO DI REDAZIONE:

NADIA BALDASSINO Università di Trento, Italia
 ANDREA CAMPIOLI "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 PAOLO CASTALDO "Politecnico" di Torino, Torino, Italia
 MARIO DE MIRANDA IUAV Università di Venezia
 RAFFAELE LANDOLFO Università di Napoli "Federico II", Italia
 EMANUELE MAIORANA Isolcomit Srl, Legnaro (PD), Italia
 GIOVANNI METELLI University of Brescia, Italia
 EMIDIO NIGRO Università di Napoli "Federico II", Italia
 VINCENZO PILUSO Università di Salerno, Italia
 SHAHAB RAMHORMOZIAN University of Auckland, New Zealand
 ATSUSHI SATO Nagoya Institute of Technology, Japan
 SERGIO SCANAVINO Istituto Italiano di Saldatura, Italia
 MARCO SIMONCELLI "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 LUCIA TIRCA Concordia University of Montreal, Canada

COMITATO EDITORIALE ESECUTIVO: GIANCARLO CORACINA,
 BENEDETTO CORDOVA, RICCARDO DE COL, ALBERTO VINTANI

COMITATO SCIENTIFICO:

GIULIO BALLIO "Politecnico" di Milano, Milano, Italia,
 CLAUDIO BERNUZZI "Politecnico" di Milano, Milano, Italia,
 MARIO D'ANIELLO Università di Napoli "Federico II", Italia
 LUIGINO DEZI Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia
 ERIC DUBOSC Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris, France
 DAN DUBINA Polytechnic University of Timisoara, Timisoara, Romania
 FEDERICO M. MAZZOLANI Università di Napoli "Federico II", Italia
 ROSARIO MONTUORI Università di Salerno, Salerno, Italia
 RENATO MORGANTI Università degli Studi dell'Aquila, Italia
 VITTORIO NASCÈ "Politecnico" di Torino, Italia
 D.A. NETHERCOT Imperial College London, London, UK
 MAURIZIO PIAZZA Università di Trento, Trento, Italia
 COLIN ROGERS McGill University, Montreal, Canada
 LUIS SIMOES DA SILVA University of Coimbra, Portugal
 ENZO SIMERO Università Telematica E-campus, Italia
 CARLO URBANO "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 RICCARDO ZANDONINI Università di Trento, Trento, Italia

SEGRETERIA: VALERIA PASINA

EDITORE: GIANGIACOMO FRACCHIA EDITORE Srl
 Via C. Goldoni 1, 20129 Milano, tel. 02 49524930
 C.F./P.Iva: 07153040964 - CCAA Milano REA n° 1939256

UFFICIO ABBONAMENTI: CTA Collegio Tecnico dell'Acciaio,
 20129 Milano, Viale dei Mille, 19
 tel. 02 784711; costruzionimetalliche@ctanet.it
 http://www.collegiotecniciacciaio.it/costruzionimetalliche/

CONCESSIONARIA PUBBLICITÀ:

Agicom srl, Viale Caduti in Guerra, 28,
 00060 Castelnuovo di Porto (RM)
 Tel. +39 069078285 | www.agicom.it
 Domenica Cipriani | 380 7544576 | domeniacipriani@agicom.it

IMPAGINAZIONE, GRAFICA E STAMPA:

GIERRE PRINT SERVICE Srl, Via Carlo Goldoni, 1
 20129 MILANO Tel. 02 49524930
 e-mail: commerciale@gierreprint.com

ABBONAMENTI PER L'ANNO 2020 (6 NUMERI):

Italia: € 60,00 - Estero: € 150,00 - Studenti: € 20,00
 Prezzo a copia: € 15,00

Garanzia di riservatezza per gli abbonati: l'Editore garantisce la massima riservatezza dei dati forniti dagli abbonati e la possibilità di richiederne gratuitamente la rettifica o la cancellazione. Le informazioni custodite nell'archivio elettronico dell'Editore verranno utilizzate al solo scopo di inviare agli abbonati eventuali proposte commerciali (legge 675/96 tutela dati personali)

La rivista non assume alcuna responsabilità delle tesi sostenute dagli Autori e delle attribuzioni relative alla partecipazione nella progettazione ed esecuzione delle opere segnalate dagli stessi Autori

La rivista è inviata ai soci del Collegio dei Tecnici dell'acciaio (C.T.A.)

Iscrizione al Tribunale di Milano in data 8 febbraio 1949,
 n. 1125 del registro.

Iscrizione ROC n. 020654 (Art.16 Legge 62 - 7/03/2001)

ISSN n. 0010-9673

Spedizione in A.P. - D.L. 353/2003 (conv. in L.27.02.14
 N. 46) - Art. 1 comma 1 CNS PD

Questo numero della rivista è stato chiuso in redazione e stampato nel mese di settembre 2024

È vietata e perseguibile per legge la riproduzione totale o parziale di testi, articoli, pubblicità ed immagini pubblicate su questa rivista sia in forma scritta, sia su supporti magnetici, digitali, ecc.

COSTRUZIONI METALLICHE

ANNO LXXVI

LUG-AGO 2024

 www.facebook.com/CMrivista

costruzionimetalliche@ctanet.it

In copertina: *Vista esterna della facciata e della tensostruttura a sostegno della copertura del "New Administrative Capital Stadium" al Cairo - Egitto*



9	EDITORIALE GIOVANNI COSTA	CARI AMICI LETTORI
12	REALIZZAZIONI MASSIMO MAJOWIECKI, STEFANO PINARDI, GIOVANNI BERTI, ELISA SAMMARCO, GIULIANO ALOISIO, MONICA MINGOZZI	IL NUOVO STADIO DEL CAIRO: COPERTURA SOSPESA E TRIBUNE
24	REALIZZAZIONI ALESSANDRO CATANZANO	IL MONTAGGIO DEL NUOVO PONTE DRINI A KUKËS (Albania)
32	REALIZZAZIONI MAURO EUGENIO GIULIANI	FERRERO TECHNICAL CENTER – ALBA
39	INGEGNERIA MATTEO CONT, MICHEL FALTZ,	SUSTAINABLE BRIDGE DESIGN IN THE ERA OF INDUSTRY 4.0
50	RICERCA LORENZO RAFFAELE, LUCA BRUNO, ELISABETTA COLUCCI	LA MAPPA DEI VENTI ESTREMI ITALIANI: TRENT'ANNI DOPO
59	INGEGNERIA VITTORIA LAGHI, GIADA GASPARINI, MICHELE PALERMO, TOMASO TROMBETTI	LA STAMPA 3D METALLICA DI GRANDI DIMENSIONI PER UNA NUOVA GENERAZIONE DI SOLUZIONI STRUTTURALI AD ALTA EFFICIENZA
66	RICERCA FABRIZIO ASCIONE, FRANCESCO ESPOSITO, GIACOMO IOVANE, DIANA FAIELLA, BEATRICE FAGGIANO, ELENA MELE	SISTEMI STRUTTURALI SOSTENIBILI ED EFFICIENTI PER EDIFICI ALTI: EDIFICI IN LEGNO E IBRIDI ACCIAIO-LEGNO IN RIFERIMENTO AD UN CASO STUDIO
85	ARCHITETTURA SERENA GIORGI	COSTRUIRE NEL COSTRUITO. CONTINUITÀ FORMALE E INNOVAZIONE TECNOLOGICA
99	EUROCODICI E NORMATIVE FEDERICO M. MAZZOLANI, ALBERTO MANDARA	L'EUROCODICE 9 DI SECONDA GENERAZIONE SULLE STRUTTURE IN ALLUMINIO
105	EUROCODICI E NORMATIVE DARIO AGALBATO	NUOVO REGOLAMENTO PRODOTTI DA COSTRUZIONE
112	ACCIAIO E FUOCO FRANCESCO SAVERIO CIANI, LINDA CAIRA	STORIA DELLA RESISTENZA AL FUOCO DELLE STRUTTURE: DALL'APPROCCIO PRESCRITTIVO AL PRESTAZIONALE
119	CULTURA DELLE COSTRUZIONI METALLICHE MATTEO ABITA, DANILO DI DONATO, ALESSANDRA TOSONE, RENATO MORGANTI	TUBI IN ACCIAIO SENZA SALDATURA PER EDIFICI A STRUTTURA METALLICA. SPERIMENTAZIONI E BREVETTI DELLA DALMINE 1906-1976.
131	AcelorMittal, abaGRIGLIATI, CSI Italia, CSPFea, Dlubal, EISEKO, HEMPEL, INNOVATIONS, NORD-LOCK, PPG, TOKBO, KRABO	XXIX CONGRESSO CTA MILANO 26-28 SETTEMBRE 2024 GLI SPONSOR

LA MAPPA DEI VENTI ESTREMI ITALIANI: TRENT'ANNI DOPO

THE MAP OF ITALIAN EXTREME WINDS: THIRTY YEARS LATER

Lorenzo Raffaele*, Luca Bruno, Elisabetta Colucci

Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Gruppo di ricerca e sviluppo GeoWindy, Torino, Italia

Le costruzioni metalliche sono notoriamente tra le più sensibili all'azione del vento, a causa della loro elevata snellezza e leggerezza, e del ridotto smorzamento strutturale. Nel 1991 G. Ballio, S. Lagomarsino, G. Piccardo e G. Solari pubblicarono su *Costruzioni Metalliche* i criteri, la metodologia e i risultati della mappatura dei venti estremi italiani, ottenuta sulla base delle misure in stazioni anemometriche al suolo distribuite sul territorio nazionale. La traduzione normativa di quel lavoro innovativo ha avuto un impatto straordinario sul progetto di strutture al vento, diventando patrimonio culturale comune degli ingegneri e architetti italiani ed europei. A più di trent'anni di distanza, nuovi metodi e basi dati computazionali e satellitari offrono la possibilità di riconsiderare la mappa dei venti correnti ed estremi italiani, nella prospettiva di raffinare la modellazione dai venti sinottici sin qui considerati con scale spaziali di centinaia di km a quelli alla mesoscala fino a scale spaziali di 2 km. Questo articolo ha l'obiettivo di formalizzare, implementare, discutere criticamente e verificare questa prospettiva. I risultati ottenuti permettono di offrire al progettista un approccio innovativo, e uno strumento di semplice utilizzo, consistente e uniformemente esteso a tutto il territorio nazionale.

*Metal structures are notoriously among the most sensitive to wind action, due to their high slenderness and lightweight, and reduced structural damping. In 1991, G. Ballio, S. Lagomarsino, G. Piccardo, and G. Solari published in *Costruzioni Metalliche* the criteria, methodology, and results of the mapping of extreme Italian winds, based on measurements from land anemometric stations distributed throughout the national territory. The codification of such an innovative study had an extraordinary impact on the design of wind loaded structures, becoming a shared cultural heritage of the Italian and European engineers and architects. More than thirty years later, new methods, computational and satellite databases offer the possibility of reconsidering the map of current and extreme Italian winds, with the aim of refining the modeling from the synoptic winds considered so far with spatial scales of hundreds of km to those at the mesoscale down to spatial scales up to 2 km. This study aims to formalize, implement, critically discuss, and verify this perspective. The obtained results allow offering the designer an innovative approach, and an easy-to-use tool, consistent and uniformly extended over the whole national territory.*

1 CONTESTO E OBIETTIVO DELLO STUDIO

Le strutture metalliche sono note per essere particolarmente sensibili all'azione del vento, a causa della loro elevata snellezza, leggerezza e ridotto smorzamento strutturale. I carichi di progetto indotti dal vento dipendono dal quadrato della velocità del vento: stabilire quest'ultima è determinante per valutarli adeguatamente.

Nel 1991, G. Ballio, S. Lagomarsino, G. Piccardo e G. Solari pubblicarono

su *Costruzioni Metalliche* [1][2] i criteri, il metodo e i risultati della mappatura dei venti estremi italiani, in accordo con i principi fondamentali delineati nei primi anni Sessanta da uno dei padri fondatori dell'Ingegneria del Vento, A.G. Davenport [3]. L'approccio a due fasi 'map-and-return', definitivamente stabilito da Ballio et al. in [4], è schematizzato in figura 1a. La fase di mappatura 'map' consiste nell'acquisizione della velocità del vento v media su 10 minuti misurata presso stazioni anemometriche locali

*Corresponding author. Email: lorenzo.raffaele@polito.it

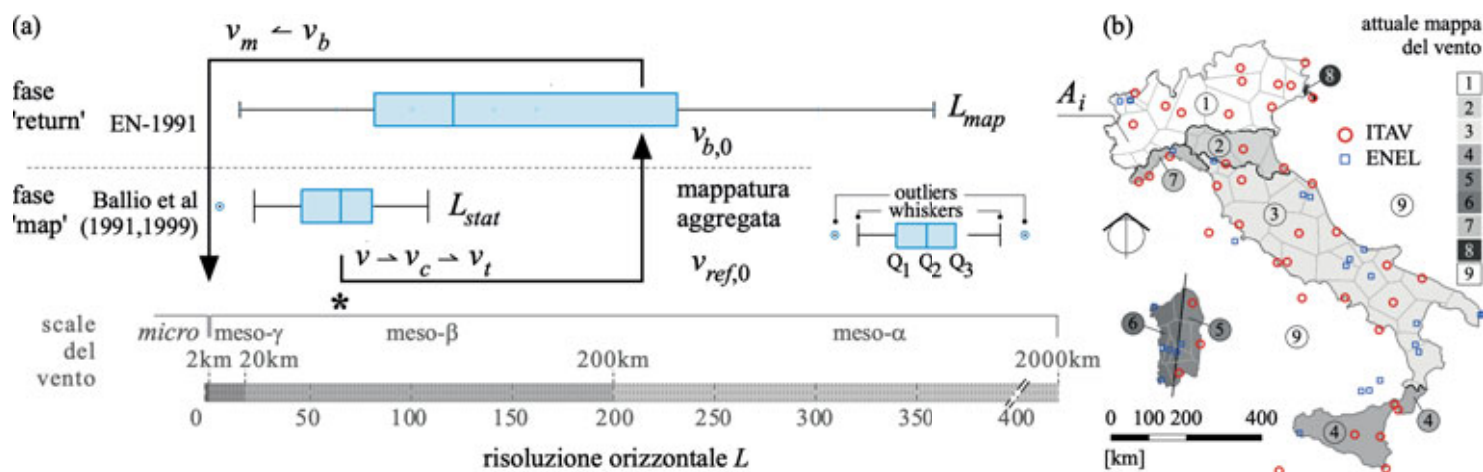


Fig. 1 – Schema dell'attuale approccio codificato 'map-and-return' (a); posizione delle 69 stazioni in [4], le loro aree di competenza, e la mappa italiana del vento risultante [5][6](b)

variamente spaziate tra loro (L_{stat} , sua statistica e valor medio contrassegnato da "*" in figura 1a), la sua correzione v_c , trasformazione v_t e analisi probabilistica dei valori estremi $v_{ref,0}$. Questo processo non è necessariamente esplicitato al progettista se non nel suo esito finale codificato [5][6], ovvero la mappa nazionale del vento che raggruppa le zone climatiche, nove per l'Italia con estensione da una decina alle centinaia di km (L_{map} e sua statistica in figura 1a). La seconda fase, invece, è direttamente affidata al progettista tramite il cosiddetto 'return criterion' [4], al fine di ricavare dalla velocità di riferimento mappata ($v_{b,0}$ in [7]) il valore di velocità di progetto (v_m in [7]), considerando le caratteristiche locali del sito di costruzione: altezza sul livello del mare, rugosità aerodinamica, orografia e distanza dalla linea di costa, altezza di riferimento della costruzione. Da un lato, questo studio innovativo rappresentò il compimento di uno sforzo di modellizzazione brillante e pionieristico per fornire uno strumento pratico di progettazione basato su misurazioni da stazioni anemometriche al suolo

la cui disponibilità era relativamente limitata all'epoca, complessivamente circa 10 milioni di dati presso 69 stazioni [4] (figura 1b). Dall'altro, la disseminazione su Costruzioni Metalliche e la successiva trasposizione normativa del metodo stabilito da Ballio et al. [5][6][7] ha avuto un impatto straordinario sulla progettazione di strutture esposte al vento, diventando un patrimonio culturale condiviso degli ingegneri e architetti italiani ed europei. In sintesi, Ballio e coautori fecero tanto con poco. Nonostante tali successi, entrambe le fasi dell'approccio 'map-and-return' presentano alcune criticità, già evidenziate in precedenza dagli stessi Davenport [3], Ballio e coautori [1][2]. Di seguito, queste sono sinteticamente richiamate riferendosi separatamente alla fase di mappatura e di ritorno. Le criticità nella fase di mappatura discendono direttamente da quantità e qualità delle misure anemometriche disponibili, ovvero dalla spaziatura delle stazioni di misura al suolo, dalla durata delle serie temporali, dalle caratteristiche locali del sito di installazione di ogni stazione e dalle spe-

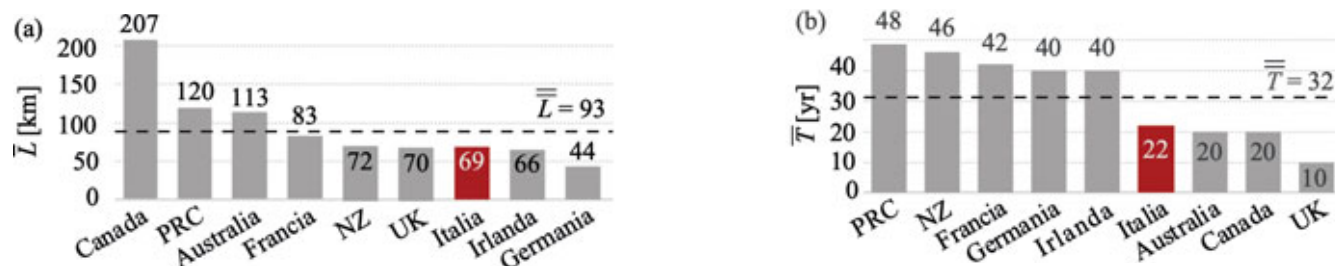


Fig. 2 – Risoluzione orizzontale media delle stazioni anemometriche (a) e durata media delle serie temporali (b) utilizzate per definire le mappe nazionali della velocità del vento di progetto per Canada [8], Cina [9], Australia [10], Francia [11], Nuova Zelanda [12], Regno Unito [13], Italia [1][2][4], Irlanda [14], Germania [15].

cifiche degli strumenti di misura.

La spaziatura delle stazioni, 'risoluzione orizzontale' L nel seguito, sulla porzione di superficie terrestre di interesse, ad esempio un singolo Paese, è spesso bassa. La figura 2a diagramma il valore \bar{L} mediato sulle stazioni considerate per definire le mappe nazionali della velocità del vento estremo in 9 Paesi. Il valore ulteriormente mediato su tutte le nazioni \bar{L} è dell'ordine di grandezza di 100 km, mentre quello medio europeo è pari a circa 66 km. Inoltre, L è abitualmente disuniforme all'interno di un singolo Paese. A titolo di esempio, la figura 1b mappa la tassellazione di Voronoi del territorio italiano con riferimento alle 69 stazioni utilizzate per definire i venti estremi italiani, e la figura 1a mostra la statistica di $L_{stat} = \sqrt{A_i}$, dove A_i è l'area dell' i -esimo tassello, attraverso il diagramma a scatola e baffi (*box plot* nel seguito). Escludendo le isole minori, la risoluzione varia nell'intervallo [7,110] km.

L'estensione delle serie storiche di misurazione T è solitamente più breve rispetto al periodo di ritorno di riferimento T_R della velocità del vento di

progetto di interesse e disuniforme tra le diverse stazioni. Ad esempio, la figura 2b esamina l'estensione delle serie temporali \bar{T} mediate sulle stazioni anemometriche utilizzate per definire le mappe nazionali della velocità del vento di progetto nei 9 Paesi già considerati in figura 2a. Il valore medio su tutte le nazioni \bar{T} è di circa 30 anni. Di conseguenza, T non garantisce necessariamente la convergenza statistica della velocità del vento di progetto di interesse.

A dispetto delle linee guida dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO, [16]), la configurazione reale delle stazioni anemometriche non è necessariamente omogenea nello spazio e costante nel tempo. Nonostante gli anemometri debbano essere posizionati a 10 m di altezza dal suolo e situati in terreni aperti e piani in un intorno di 2 km di raggio per evitare effetti locali sul vento misurato, la loro posizione effettiva, l'altezza sopra il suolo e la rugosità aerodinamica nei loro dintorni non sono necessariamente standard, uniformi in spazio e costanti in tempo. A titolo di esempio, la rugosità aerodinamica può variare fortemente nel

medio termine a causa del rapido sviluppo urbano [9], e nel breve termine in ragione dei cambiamenti stagionali della densità delle foglie della vegetazione [17], o di una singola nuova costruzione in prossimità della stazione che perturba localmente velocità e direzione del vento. Riguardo all'anemometro in sé, numerose sue caratteristiche possono influire sulla misura [18]: tipologia, modello e relative specifiche, valore di soglia di acquisizione, risoluzione, deterioramento della accuratezza durante la vita utile, catena di acquisizione dati. La figura 3 riporta un esempio emblematico di molte delle criticità sopra menzionate, riferendosi alle misure anemometriche a Milano Malpensa,

uno degli aeroporti più grandi e meglio attrezzati in Italia. La serie temporale delle velocità medie annue (figura 3a) evidenzia un andamento a tratti e una tendenza lineare complessivamente decrescente non imputabili a cambiamenti climatici, e caratterizzato da alcune discontinuità in valore non giustificabili da dinamiche atmosferiche (anni 1992, 2000, 2012). Questi errori di misura possono essere riconducibili a più concause: variazione della posizione dell'anemometro, come già messo in evidenza dagli stessi Ballio et al [1] (figura 3b); posizione e numero degli anemometri (figure 3c-g); effetti locali sul vento indotti dalla costruzione di nuovi edifici in occasione delle espansioni dell'aero-

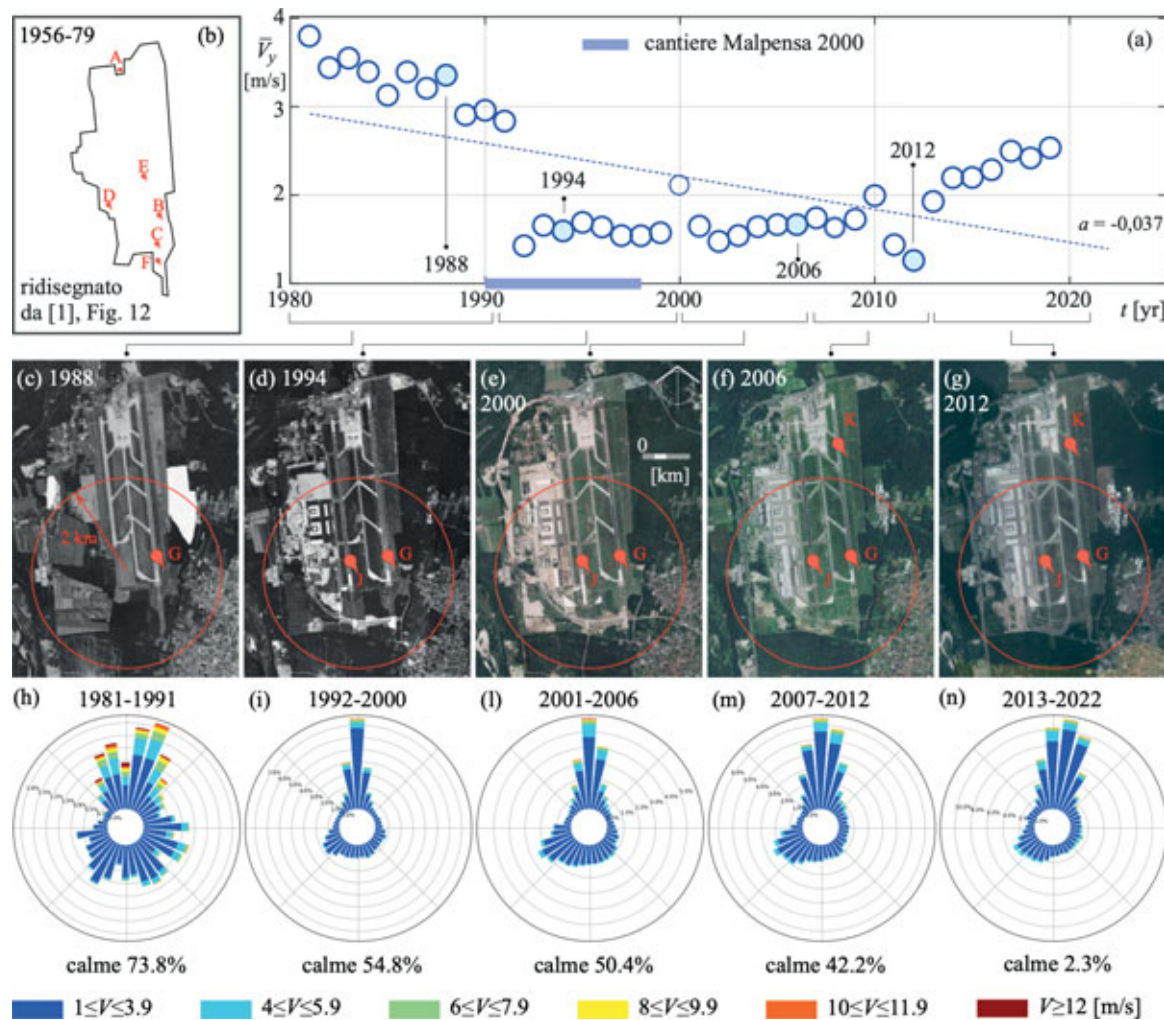


Fig. 3 – Serie temporale della velocità media annua misurata alla stazione di Milano Malpensa (a); posizioni dell'anemometro prima del 1980, così come riportate da Ballio et al [1] (b); posizioni degli anemometri dopo il 1980 da ortofoto (c-g, fonte www.pcn.minambiente.it) e relative rose dei venti con percentuali di calme (h-n)

porto, e in particolare quella di Malpensa 2000 tra il 1990 e il 1998 come dimostrato dalla variazione delle direzioni prevalenti nelle rose dei venti (figure 3h-n); specifiche degli anemometri e in particolare il loro valore di soglia di acquisizione, come dimostrato dalla variabilità delle percentuali di calme nominali (figure 3h-n).

Le criticità nella fase di ritorno riflettono indirettamente quelle in fase di mappatura, rendendosi necessaria a cura del progettista la modellazione delle specifiche caratteristiche del sito di progetto e i loro effetti sul vento. Tra queste, la valutazione soggettiva e sfidante della rugosità aerodinamica z_0 [19], le variazioni tra le diverse categorie di terreno e i relativi valori di z_0 nei codici normativi, e la stima degli effetti dell'orografia locale del terreno. È infatti difficile per il progettista collegare in modo univoco il sito di costruzione alle categorie di terreno spesso descritte qualitativamente nei codici normativi [5][6][7], adottare un valore di z_0 di fronte a diverse disposizioni per la stessa categoria di terreno nominale (ad

esempio $z_0=0,003$ m e $z_0=0,01$ m per le aree costiere rispettivamente in Eurocodice 1 [7] e DM 2018 [5]), e fare riferimento a scenari semplificati bidimensionali (ad esempio quelli forniti nell'allegato A.3 dell'Eurocodice 1 [7]) per valutare gli effetti locali delle caratteristiche orografiche reali, tridimensionali del sito.

Ciascuna delle criticità evidenziate può tradursi in una fonte di errore di misurazione o di incertezza di modellazione, che influiscono sulla accuratezza della valutazione della velocità del vento di progetto.

A più di trent'anni di distanza, vaste basi dati computazionali e satellitari e innovativi metodi di analisi offrono la possibilità di un cambiamento di paradigma nella definizione della mappa dei venti italiani correnti ed estremi. Tali metodi e dati sono stati sviluppati negli ultimi 25 anni dalla comunità scientifica della fisica dell'atmosfera. Se gli autori hanno meriti per questo studio, consistono nell'adattare una piccola parte di tale conoscenza alle esigenze dell'Ingegneria Strutturale, con l'obiettivo

di perfezionare la modellazione dai venti sinottici finora considerati con scale spaziali di centinaia di km a quelli alla mesoscala fino al suo limite inferiore pari a circa 2 km.

2 APPROCCIO BASATO SU VERY HIGH RESOLUTION REANALYSIS

Un nuovo approccio a due fasi denominato 'Very High Resolution Rea-

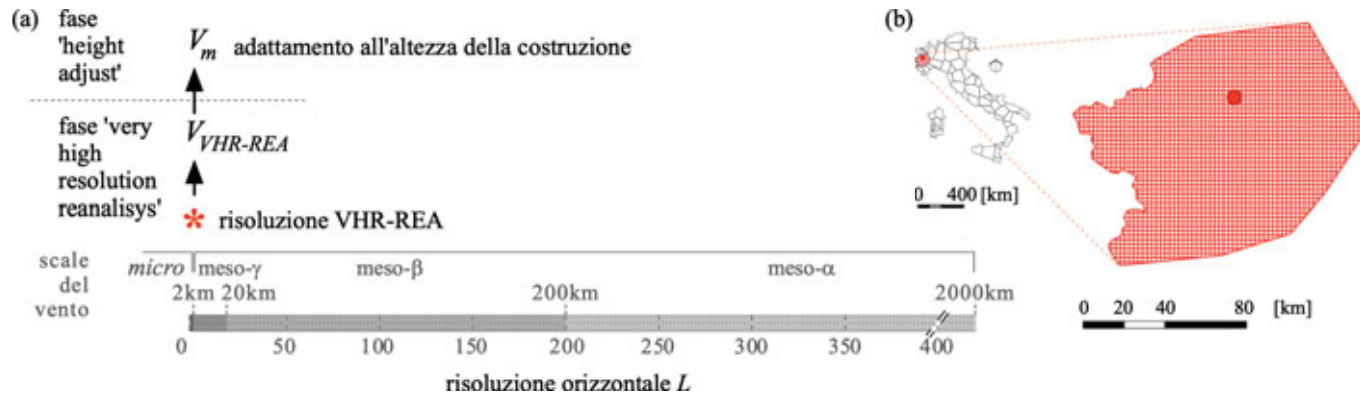


Fig. 4 – Schema dell'approccio proposto VHR-REA-ha (a); area di competenza della singola stazione al suolo di Torino, estratta dalla griglia orizzontale di VHR-REA (b, 2425 celle)

analysis - height adjust (VHR-REA-ha, Rianalisi ad altissima risoluzione - correzione dell'altezza) è proposto e schematizzato in figura 4a. La prima fase 'Very High Resolution Reanalysis' (VHR-REA) è interamente affidata una volta per tutte allo specialista esperto responsabile della

redazione delle mappe del vento, mentre la fase 'height adjust' (ha) è gestita dal progettista, in analogia con l'approccio 'map-and-return'. La velocità del vento adirezionale di progetto $V_m(h_d)$ è espressa nel metodo VHR-REA-ha come

$$V_m = \gamma_m \cdot V_{VHR-REA} \cdot \frac{\ln \frac{h_d}{z_0}}{\ln \frac{h_{ref}}{z_0}}, \quad (1)$$

dove z_0 (lat,lon) rappresenta la rugosità aerodinamica mappata sull'intero territorio italiano (figura 5), $V_{VHR-REA}$ (lat,lon) è la velocità del vento rilevante per il progetto mappata all'altezza di riferimento $h_{ref}=10$ m, h_d è l'altezza di progetto rilevante per la struttura in esame, γ_m è un fattore di correzione del modello che compensa in forma sintetica, forfettaria e globale le approssimazioni e gli errori del modello VHR-REA. Nello studio, sono valutate l'intera distribuzione di probabilità della velocità media del vento \bar{V} rilevante per il progetto a fatica, e le velocità del vento estremo V_{TR} con periodi di ritorno $T_R=2,50,100,200$ anni.

La modellazione del vento VHR-REA costituisce il cuore dell'approccio proposto. Essa consiste in una catena di simulazioni numeriche di previsione del tempo (Numerical Weather Prediction), la loro rianalisi alla

luce delle misure meteorologiche, il raffinamento dinamico (downscaling in letteratura inglese e nel seguito) tramite modelli climatici regionali (convection-permitting in letteratura inglese e nel seguito), e infine l'analisi statistica dei valori estremi. I modelli fisico-matematici di rianalisi REA sono ampi e articolati, derivanti da decenni di ricerca e sviluppo. La rassegna e descrizione dettagliata di ciascun modello trascende gli obiettivi e lo sviluppo di questo articolo. Di seguito, si fa quindi riferimento ai principali articoli scientifici e documenti tecnici. I lettori interessati alle specifiche dei modelli adottati nello studio possono riferirsi al manoscritto esteso [21]. ERA5 è la quinta generazione di rianalisi globale sviluppata dal Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Termine (ECMWF, [22]). Combina un modello di previsione computazionale dello

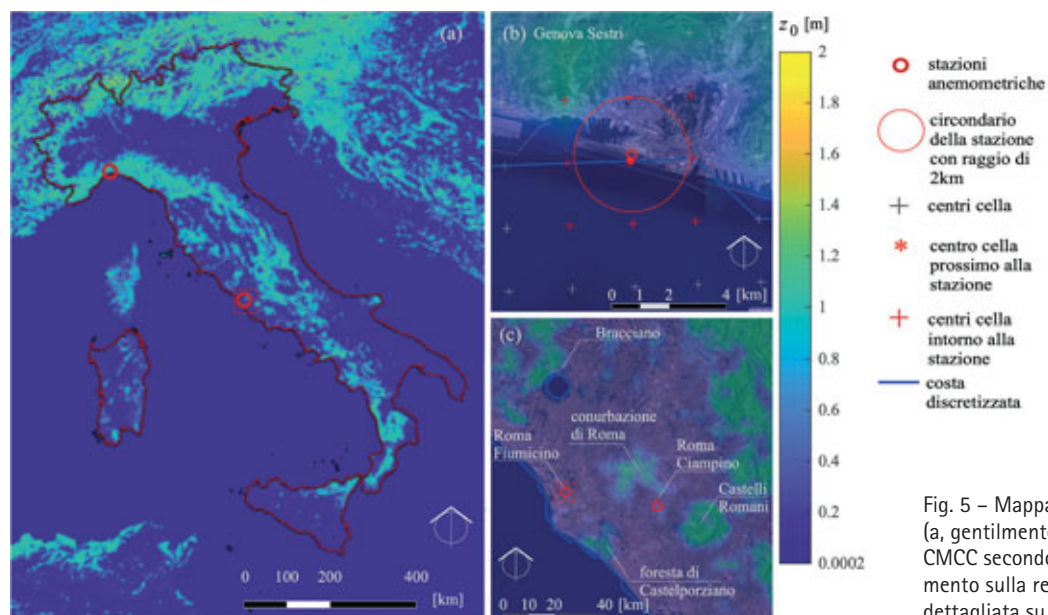


Fig. 5 – Mappatura di z_0 in VHR-REA (a, gentilmente fornita dalla Fondazione CMCC secondo GLC2000 [20]); ingrandimento sulla regione di Roma (c), e vista dettagliata su Genova Sestri (b)

stato dinamico e termodinamico dell'aria umida nell'atmosfera con dati da osservazione empirica correttamente assimilati. Complessivamente, circa 95 miliardi di osservazioni satellitari e convenzionali sono state assimilate in tutto il mondo in 40 anni, ovvero 65 milioni al giorno in media. Le osservazioni, che non includono le misurazioni anemometriche nelle stazioni al suolo, sono sottoposte a un esteso controllo di qualità variazionale [22] che implica l'esclusione di quelle non giudicate pienamente affidabili. La rianalisi è condotta con una risoluzione orizzontale di 31 km, con campionamento orario per 83 anni, dal 1941 ad oggi.

Il downscaling dinamico è realizzato da Raffa et al. [23] con il modello climatico COSMO-CLM, un modello regionale non idrostatico basato sulle equazioni termo-idrodinamiche alle derivate parziali che descrivono il flusso compressibile dell'aria umida nell'atmosfera, utilizzando i dati ERA5 come condizioni al contorno. La rugosità superficiale è ottenuta dalla mappatura della copertura del suolo attraverso la sistematica osservazione satellitare ad alta risoluzione del pianeta Terra nel progetto 'Global Land Cover database for the year 2000' (GLC2000, [20]) promosso dalla Comunità Europea. Come mostrato in figura 5b,c la mappa della rugosità include gli effetti di ostacoli diffusi naturali (ad esempio aree boscate) o costruiti (ad esempio zone urbane). Le simulazioni di downscaling hanno una risoluzione orizzontale di 2,2 km, con campionamento orario per 42

anni, dal 1981 al 2022.

L'analisi statistica finale delle serie temporali di velocità del vento su ciascuna cella dell'intero territorio italiano adotta l'approccio Peak Over Threshold [24] per definire la distribuzione di Pareto generalizzata dei valori estremi e le relative velocità del vento con periodi di ritorno adeguati. La mappa di V_{50} estesa all'intero territorio Nazionale e zone limitrofe è riportata in figura 6a. Essa consente di cogliere i regimi di vento nelle aree costiere e montuose che caratterizzano diffusamente il territorio nazionale. Si notino a titolo di esempio le elevate velocità in corrispondenza delle bocche di Bonifacio nella Sardegna del Nord, o lungo le coste tirreniche di Calabria e Sicilia. L'ingrandimento in un'area pedemontana con orografia complessa è mostrato a titolo di esempio in figura 6b per consentire di apprezzare la risoluzione della mappatura e discuterne il senso fisico. La velocità del vento è particolarmente bassa nel fondovalle di Bolzano ($V_{50} \approx 10$ m/s), in accordo con le misure in situ, ma aumenta progressivamente lungo le valli dell'Adige e del Sarca per effetto del confinamento orografico a cui si aggiunge quello della bassa rugosità della estesa superficie del lago di Garda ($V_{50} \approx 28$ m/s), coerentemente con numerosi studi in letteratura [25].

Infine, la figura 7 riporta per completezza le mappe del valor medio della velocità corrente mediata su 10 minuti \bar{V} e dei valori estremi V_2 , V_{100} e

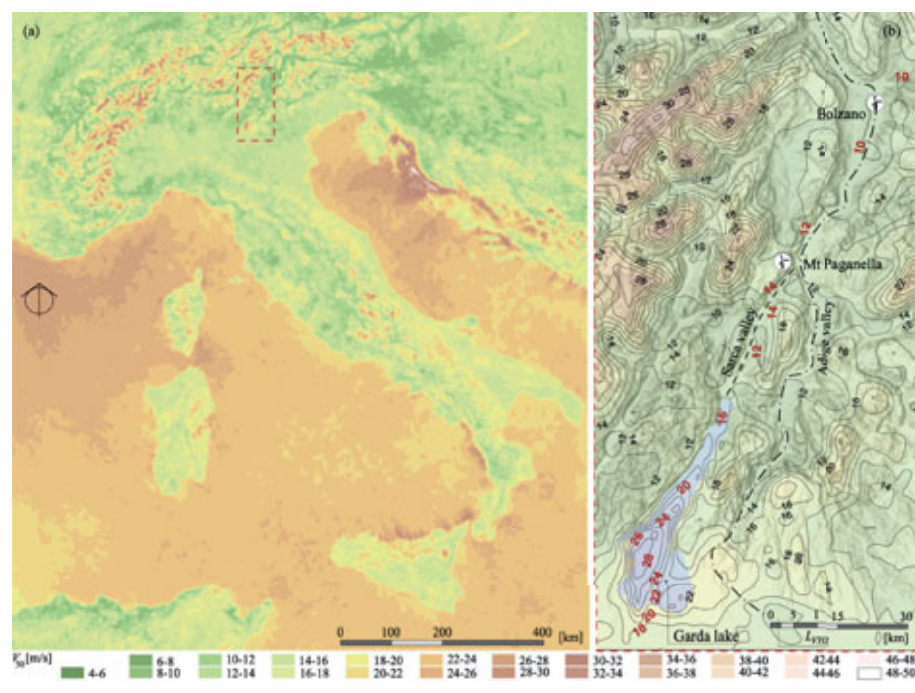


Fig. 6 – Mappa della velocità estrema del vento V_{50} con periodo di ritorno $T_{50}=50$ anni (a); vista illustrativa ravvicinata dell'area circostante le valli dell'Adige e del Sarca, fino al lago di Garda (b)

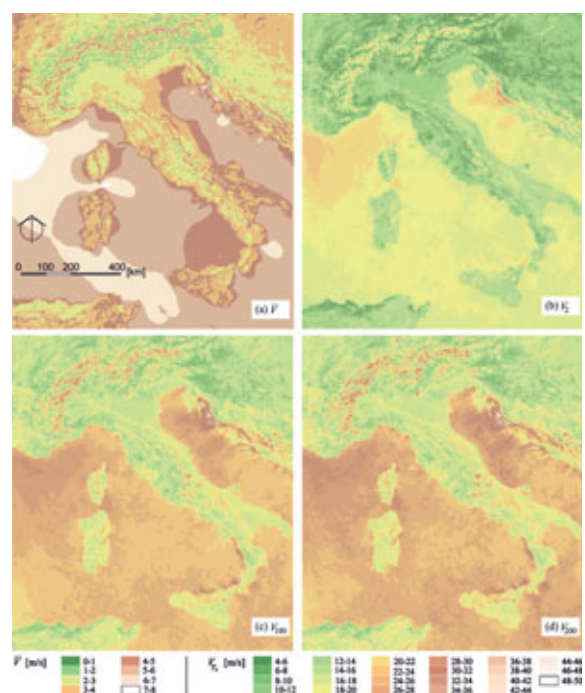


Fig. 7 – Mappa del valore medio della velocità del vento corrente \bar{V} (a), mappe della velocità estrema del vento V_{TR} con periodo di ritorno $T_R = 2$ anni (b), $T_R = 100$ anni (c), $T_R = 200$ anni (d).

V_{200} associati ai corrispondenti periodi di ritorno e pertinenti a differenti valutazioni degli stati limite di esercizio o ultimo di differenti strutture. Tutte le mappe sono restituite digitalmente grazie all'uso di strumenti di Sistema Informativo Geografico (GIS) e navigabili per l'intero territorio italiano in Open Access su <https://geowindy.polito.it/projects>.

La stesura di ciascuna mappa ha comportato l'analisi di circa 163,5 miliardi di dati su 444.000 celle, ovvero circa 160.000 volte i dati a disposizione di Ballio et al 33 anni fa.

L'approccio proposto comporta alcuni vantaggi concettuali e tecnici rispetto all'approccio attuale. Nella fase VHR-REA: i. l'elevata risoluzione orizzontale senza precedenti pari a circa 2 km offre al progettista mappe dettagliate e prive di lacune della velocità del vento e della rugosità aerodinamica sull'intero territorio italiano. Un esempio visivo della riso-

luzione limitata a una singola parte dell'Italia è fornito in figura 4b; ii. non è più necessario procedere avanti e indietro tra scale e trasformare misurazioni non omogenee e sparse; iii. ogni effetto, compreso quello orografico, è considerato in modo coerente ed esplicito fino alla scala meso- γ (corrispondente a una risoluzione spaziale di circa 2 km), mentre gli effetti alla microscaletta sono consapevolmente esclusi. Nella fase ha, il progettista: i. è sollevato da alcune attività che richiedono conoscenze specializzate in ingegneria del vento, in particolare l'obbligo di valutare soggettivamente la rugosità aerodinamica nel sito di progettazione e di ricondurre l'effettiva orografia del sito, talvolta complessa e tridimensionale, a schemi semplificati e relativi coefficienti orografici; ii. è chiamato a selezionare solo il periodo di ritorno rilevante per il progetto, a passare dall'altezza di mappatura di riferimento a quella di progettazione e ad

applicare il fattore di correzione del modello; iii. è reso consapevole di ciò che l'approccio tiene e non tiene in considerazione, essendo questi ultimi gli effetti di microscala indotti dalle caratteristiche del sito all'interno di una cella di lato 2 km centrata sulla costruzione.

3 VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DEL MODELLO VHR-REA

Le prestazioni del modello VHR-REA sono valutate confrontando i risultati delle simulazioni con le misurazioni delle stazioni ('stat' nel seguito). La capacità del modello VHR-REA di cogliere singoli eventi di vento reali, fenomenologicamente differenti, è discussa criticamente facendo riferimento alle loro scale temporali e spaziali. A titolo di esempio, la figura 8 mette a confronto le serie temporali della velocità del vento ottenute dalle

misurazioni e dai risultati VHR-REA presso due stazioni distanti 300 km nel Nord Italia, cioè Venezia e Milano Malpensa nel corso dell'anno 2018. Complessivamente, il modello VHR-REA è in grado di simulare fenomeni alla mesoscala: singoli fenomeni meteorologici meso- α (corrispondenti a scale spaziali comprese tra 200 e 2000 km) possono essere chiaramente riconosciuti in entrambe le serie temporali, ad esempio un forte evento di Scirocco (7-9 Gen.) ed il noto e distruttivo uragano mediterraneo Vaia (27-31 Ott.). Le viste ravvicinate (figure 8g,h) evidenziano come tali eventi siano catturati in entrambe le località, poiché la distanza tra le due stazioni rientra nell'intervallo meso- α . Gli eventi meteorologici meso- β (corrispondenti a scale spaziali comprese tra 20 e 200 km) indotti dai venti catabatici rimangono localizzati nelle singole serie temporali, ad esempio il vento di Bora a Venezia (21-28 Feb., figura 8d) e il vento di Foehn settentrionale a

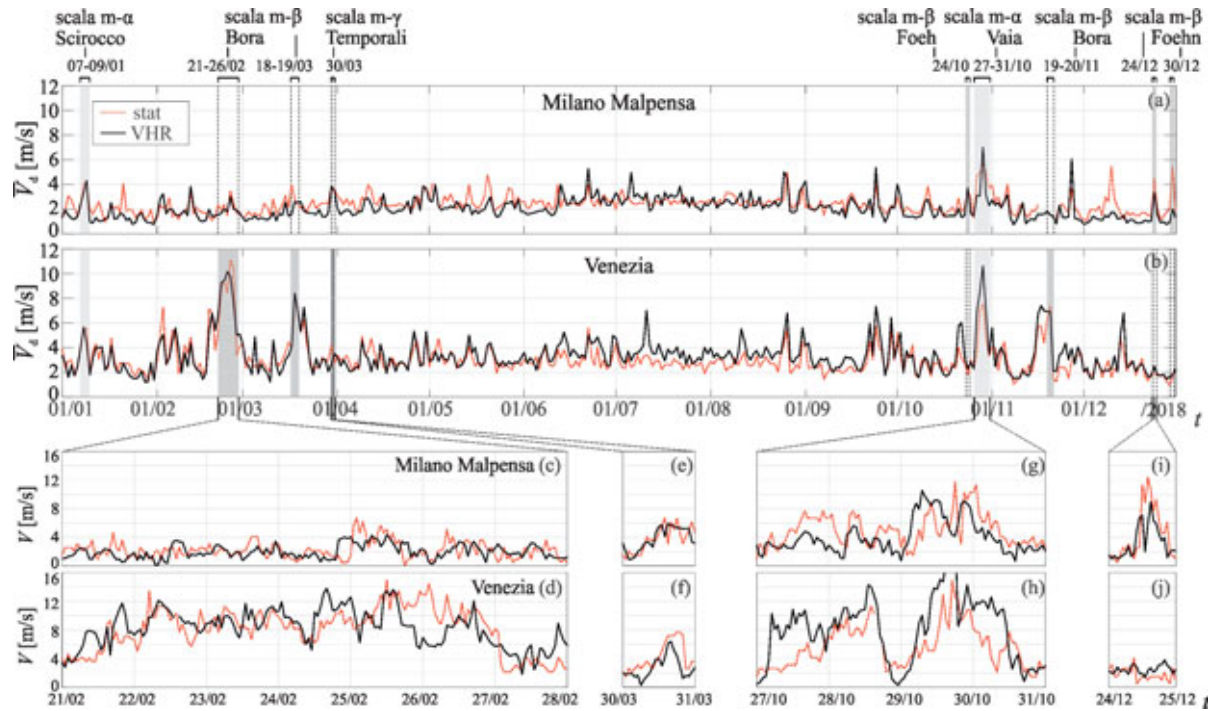


Fig. 8 – Serie temporali delle stazioni e del modello VHR-REA a Milano Malpensa e Venezia: velocità medie giornaliere \bar{V}_d nel 2018 (a, b); velocità orarie V (c-j) durante singoli eventi

Milano (24-25 Dic., figura 8i). Anche i temporali meso- γ di brevissima durata, indotti da fenomeni convettivi, sono correttamente descritti, ad esempio quello a Milano (30 Mar., figura 8e).

Il confronto è esteso e generalizzato facendo riferimento a 10 stazioni anemometriche mappate in figura 9. Le stazioni selezionate rispondono ai seguenti requisiti: i. risultano complessivamente conformi agli standard anemometrici WMO (per maggiori dettagli, i lettori sono invitati a consultare il manoscritto esteso [21]); ii. coprono il maggior numero possibile di zone climatiche con riferimento alla zonizzazione del vento attualmente vigente [5][6], (iii) sono rappresentative di condizioni di orografia e esposizione qualitativamente diverse alla mesoscala: Torino e Bologna si trovano in siti quasi pianeggianti, Reggio Calabria si trova lungo coste montuose, le restanti stazioni lungo zone costiere quasi pianeggianti. Il confronto complessivo tra VHR-REA e le misurazioni presso le 10 stazioni anemometriche è mostrato in figura 10. In particolare, si fa riferimento ai grafici di dispersione delle velocità medie (\bar{V} , figura 10a) ed estreme con periodi di ritorno di 2, 50, 100 e 200 anni ($V_2, V_{50}, V_{100}, V_{200}$, rispettivamente nelle figure 10b-e). Nel complesso, il modello VHR-REA predice velocità medie vicine, o in alcuni casi leggermente superiori, a quelle misurate. Viceversa, le velocità estreme predette da VHR-REA risultano sottostimate al crescere del periodo di ritorno fino oltre al 20% per V_{200} .

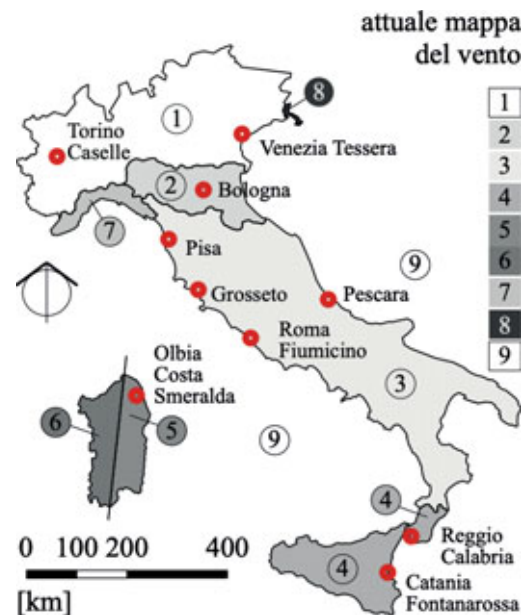


Fig. 9 – Posizione delle 10 stazioni selezionate per la valutazione delle prestazioni del modello VHR-REA, con riferimento all'attuale zonizzazione del vento [5][6].

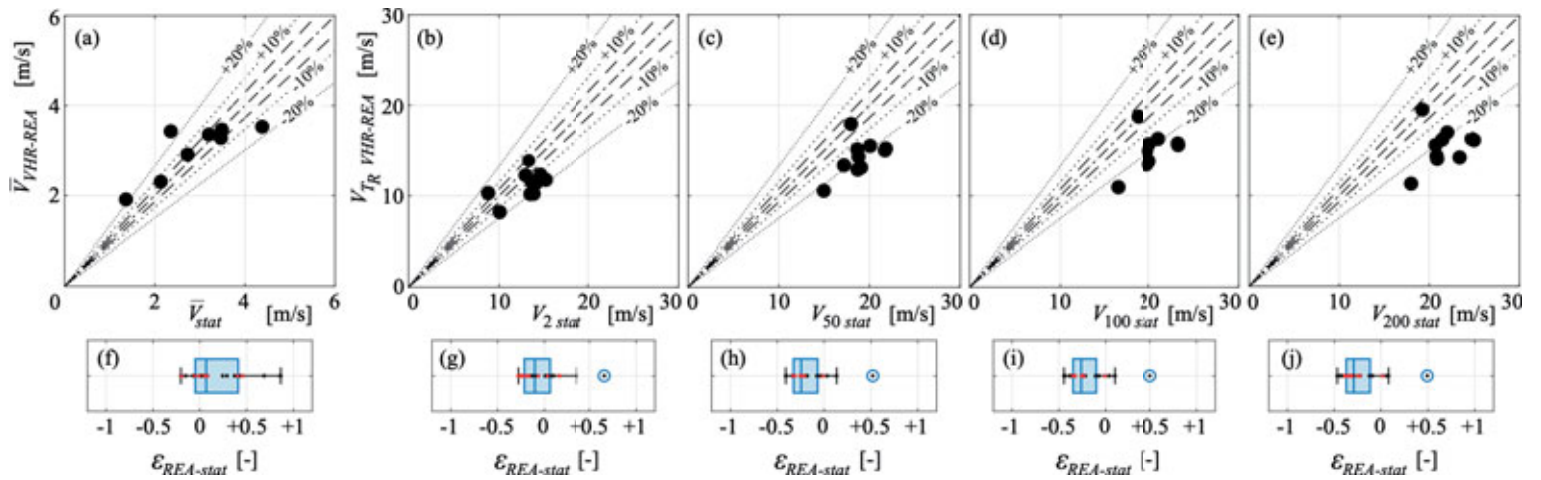


Fig. 10 - Grafici a dispersione delle velocità media \bar{V} (a) ed estreme V_{TR} (b-e) ottenute dal modello VHR-REA e dalle misurazioni stat; statistiche risultanti dell'errore relativo $\epsilon_{REA-stat}$ (f-j) eventi

L'errore relativo risultante è espresso come:

$$\epsilon_{REA-stat} = \frac{\phi_{REA} - \phi_{stat}}{\phi_{stat}}, \quad (2)$$

dove ϕ è la generica statistica di velocità, cioè \bar{V} e V_{TR} . Le statistiche dell'errore relativo in ogni stazione selezionata sono riportate in figura 10f-j in termini di box plot. VHR-REA sottostima sistematicamente le velocità del vento estreme rispetto alle misurazioni delle stazioni per periodi di ritorno crescenti, mentre T_R non influisce sensibilmente sulla

dispersione dell'errore relativo.

Alla luce delle statistiche degli errori sopra riportate, si propone una stima preliminare del fattore di correzione del modello γ_m .

La figura 11a diagramma la deviazione standard $\tilde{\epsilon}_{REA-stat}$ e il valore mediano $Q_2(\epsilon_{REA-stat})$ dell'errore relativo in funzione di T_R evidenziando

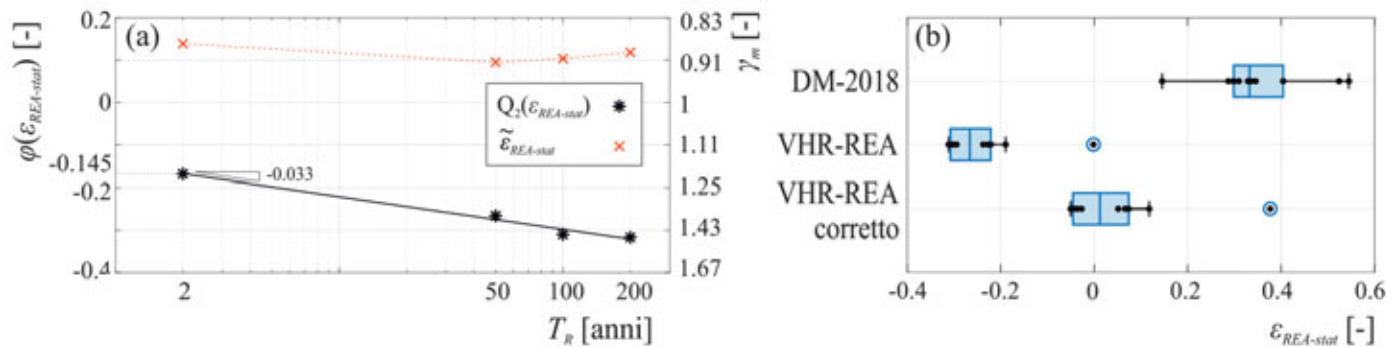


Fig. 11 - Mediana Q_2 e deviazione standard $\tilde{\epsilon}$ di $\epsilon_{REA-stat}$ per ogni periodo di ritorno, insieme al fattore di correzione γ_m (a). Errori relativi rispetto alle misurazioni per V_{50} da DM 2018 [5] e modello VHR-REA senza e con fattore di correzione (b)

rispettivamente un andamento costante ed esponenziale decrescente. Il fattore di correzione è ottenuto dal rapporto tra le velocità di riferimento

ottenute dal modello VHR-REA e dalle stazioni di misura conformi alle normative WMO:

$$\gamma_m = \frac{V_{REA}}{V_{stat}} := \frac{1}{1 + Q_2(\epsilon_{REA-stat})} \approx \frac{1}{0,855 - 0,033 \ln T_R}, \quad (3)$$

dove $Q_2(\epsilon_{REA-stat})$ è stato regredito rispetto a T_R . Segue $\gamma_m=1,20; 1,38; 1,42; 1,47$ rispettivamente per $T_R=2; 50; 100; 200$ anni. Le discrepanze tra approccio normativo (DM-2018) e modello VHR-REA sono mostrate mediante box plot in figura 11b, riferendosi in particolare alle stime di V_{50} presso stazioni conformi agli standard anemometrici.

4 CONCLUSIONI

Lo studio propone un cambio di paradigma nell'acquisizione dei dati di riferimento e nei metodi della loro analisi per la valutazione del vento di progetto di strutture e infrastrutture civili. Questo articolo dissemina

il primo sforzo di mappatura delle velocità estreme del vento al limite inferiore della risoluzione meso- γ (2 km) sull'intero territorio italiano. L'approccio proposto è sicuramente passibile di ulteriori, futuri raffinamenti di carattere tecnico volti alla riduzione delle attuali approssimazioni del modello VHR-REA. Fin d'ora pare però agli autori che l'approccio offra alcuni vantaggi rispetto a quello attualmente adottato dalla normativa: la elevata e omogenea risoluzione della mappatura su tutto il territorio nazionale; la chiara distinzione tra le scale del vento incluse nella mappa e quelle microscopiche ($L < 2$ km) non considerate; la semplificazione e la maggior oggettività delle valutazioni direttamente affidate al progettista;

la facilità di accesso ai dati mappati attraverso la geolocalizzazione della base dati disponibile in rete. Il riscontro da parte della comunità dei progettisti sarà elemento prezioso per confermare o correggere il convincimento degli autori.

La proposta consente di prefigurare numerose prospettive di ricerca e applicazione. Alcune di queste sono menzionate di seguito. All'alba della seconda generazione dell'Eurocodice 1 sull'azione del vento sulle strutture [26], l'approccio consente di elaborare una mappa europea unificata delle velocità dei venti estremi che superi le perduranti incongruenze tra le mappe nazionali ai loro confini amministrativi.

Inoltre, l'approccio proposto consente potenzialmente il continuo, agevole aggiornamento della mappatura per tener conto degli effetti del cambiamento climatico in atto e del loro impatto sull'ambiente costruito. Infine, le mappe alla mesoscala qui proposte possono essere accoppiate con simulazioni di Ingegneria del Vento Computazionale [27] o prove in galleria del vento a scala microscopica per considerare gli effetti locali dell'orografia, della transizione di rugosità, e di specifici ostacoli in prossimità della struttura, laddove ritenute necessarie dal progettista alla luce delle specifiche caratteristiche del sito di progetto e della struttura.

RINGRAZIAMENTI

Questo studio è stato condotto nell'ambito del progetto RETURN Extended Partnership e ha ricevuto finanziamenti dall'Unione Europea Next-GenerationEU (National Recovery and Resilience Plan – NRRP, Mission 4, Component 2, Investment 1.3 – D.D. 1243 del 2 agosto 2022, PE0000005) – SPOKE TS 2. Lo studio è stato sviluppato congiuntamente nel quadro del progetto di ricerca PROtection Technologies from Eolian Events for Coastal Territories (PROTECT, <http://www.protect.polito.it>) ai sensi del Decreto Ministeriale n. 1062/2021 e 1332 e ha ricevuto finanziamenti dal FSE REACT-EU - PON Ricerca e Innovazione 2014-2020.

Gli autori ringraziano F. Giulio Tonolo e F. Rinaudo, membri del gruppo di ricerca e sviluppo GeoWindy (<https://geowindy.polito.it>), per le stimolanti discussioni sul tema generale dello studio. Lo studio si basa sul dataset VHR-REA_IT ([23], https://doi.org/10.25424/cmcc/era5-2km_italy) sviluppato dal Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), senza il quale non sarebbe stato possibile.



LORENZO RAFFAELE

Ricercatore a tempo determinato in Tecnica delle Costruzioni presso il Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino. Laurea Magistrale in Ingegneria Civile – Strutture presso Università di Bologna. Dottore di Ricerca in Ingegneria Civile e Ambientale presso Politecnico di Torino. Marie Curie Fellow e Visiting Professor nell'ambito del progetto di ricerca europeo HyPer SMM nel biennio 2020-2022 presso von Karman Institute for Fluid Dynamics (Belgio). Coordinatore del gruppo giovani dell'Associazione Italiana per l'Ingegneria del Vento ANIV-G. Coordinatore dei gruppi di ricerca Windblown Sand Modelling and Mitigation e GeoWindy.



LUCA BRUNO

Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni presso il Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino. Laurea in Architettura presso Politecnico di Torino. Master in Dynamique des Structures et Couplages presso l'École National des Ponts et Chaussées (Francia). Dottore di Ricerca in Ingegneria delle Strutture presso Politecnico di Torino, e in Meccanica dei Fluidi presso l'Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Équilibre (Francia). Presidente dell'Associazione Italiana per l'Ingegneria del Vento nel quadriennio 2019-2023. Coordinatore del gruppo ANIV-CWE sull'Ingegneria del Vento Computazionale. Fondatore del gruppo di ricerca Windblown Sand Modelling and Mitigation.



ELISABETTA COLUCCI

Ricercatrice a tempo determinato in Geomatica presso il Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino, Laboratorio di elopment presso il Politecnico di Torino. Segretaria del gruppo di lavoro ISPRS WG IV, commissione I "Spatial Data Representation and Interoperability". Segretaria della SIFET Piemonte, Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia. Coordinatrice del gruppo di ricerca GeoWindy. Componente del Glacier Lab del Politecnico di Torino. Tutor del Team Studentesco DiRECT (Disaster and Recovery Team).



GEOWINDY

(sito web: <https://geowindy.polito.it/>, email: geowindy@polito.it) è un gruppo di ricerca e sviluppo multidisciplinare attivo nel campo della mappatura della pericolosità e del rischio indotto dall'azione del vento su strutture, infrastrutture critiche, comunità e ambiente naturale. Il metodo adottato è multidisciplinare, multi-scala e multi-approccio. Il gruppo comprende esperti in ingegneria delle strutture e del vento, meccanica dei fluidi e geomatica. L'azione del vento viene valutata e rappresentata alle scale macro, meso e micro. Il gruppo si avvale di simulazioni computazionali, tecniche di telerilevamento e rilievo metrico 3D multi-sensore e multi-piattaforma e analisi geospaziali in ambiente GIS.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Ballio, G., Lagomarsino, S., Piccardo, G., Solari, G., 1991. A first step towards the map of Italian extreme winds. part 1: General principles and analysis methodology. *Costruzioni Metalliche* 3, 147–172
- [2] Ballio, G., Lagomarsino, S., Piccardo, G., Solari, G., 1991. A first step towards the map of Italian extreme winds. part 2: Results, repercussion on standards, design implications. *Costruzioni Metalliche* 4, 209–242
- [3] Davenport, A., 1960. Rationale for determining design wind velocities. *Journal of the Structural Division* 86, 39–68
- [4] Ballio, G., Lagomarsino, S., Piccardo, G., Solari, G., 1999. Probabilistic analysis of Italian extreme winds: Reference velocity and return criterion. *Wind and Structures* 2, 51–68
- [5] DM 17-01-2018, 2018. Technical Standards for Construction - update DM 1460 January 17, 2018. Ministry of Infrastructures and Transport. 1461 Rome, Italy
- [6] CNR-DT 207 R1/2018, 2018. Guide for the assessment of wind actions and effects on structures. National Research Council (CNR). Rome, Italy
- [7] EN 1991-1-4:2005, 2005. Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1- 1497 4: General actions – Wind actions. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium
- [8] Hong, H., Ye, W., 2014. Estimating extreme wind speed based on regional frequency analysis. *Structural Safety* 47, 67–77
- [9] Mo, H., Hong, H., Fan, F., 2015. Estimating the extreme wind speed for regions in China using surface wind observations and reanalysis data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 143, 19–33
- [10] Spassiani, A.C., Mason, M.S., 2021. Application of Self-organizing Maps to classify the meteorological origin of wind gusts in Australia. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 210, 104529
- [11] Sacré, C., 1993. Estimation des vitesses extrêmes du vent en France métropolitaine. Technical Report. Note CSTB, EN CLI 93.9 R.
- [12] Safaei Pirooz, A.A., Flay, R.G., Turner, R., 2021. New Zealand design wind speeds, directional and lee-zone multipliers proposed for AS/NZS 1170.2:2021. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 208.
- [13] Cook, N., Prior, M., 1987. Extreme wind climate of the United Kingdom. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 26, 371–389.
- [14] Logue, J., 1989. The estimation of extreme wind speeds over standard terrain in Ireland. Technical Report. Irish Meteorological Service Technical Note 51, Dublin.
- [15] Kasperski, M., 2002. A new wind zone map of Germany. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90, 1271–1287.
- [16] WMO-No.8/2021, 2021. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Eighth edition. World Meteorological Organization (WMO). Geneva, Switzerland
- [17] Dolman, A., 1986. Estimates of roughness length and zero plane displacement for a foliated and non-foliated oak canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 36, 241–248
- [18] Picozzi, V., Akbaba, A., Avossa, A., Ricciardelli, F., 2022. Correction of historical records to improve the reliability of design wind speeds. *Engineering Structures* 265, 114473
- [19] Yu, J., Stathopoulos, T., Li, M., 2023. Exposure factors and their specifications in current wind codes and standards. *Journal of Building Engineering* 76, 107207
- [20] Bartholomé, E., Belward, A., 2005. GLC2000: A new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing* 26, 1959–1977
- [21] Raffaele, L., Bruno, L., Colucci, E., 2024. Reanalysis-based mesoscale wind maps for the design of structures and infrastructures with an application to Italy. Disponibile in Open Access doi: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4822434>
- [22] Hersbach, H. et al, 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999–2049
- [23] Raffa, M. et al, 2021. VHR-REA_IT Dataset: Very High-Resolution Dynamical Downscaling of ERA5 Reanalysis over Italy by COSMO-CLM. *Data* 6, 88
- [24] Torrielli, A., Repetto, M.P., Solari, G., 2013. Extreme wind speeds from long-term synthetic records. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 115, 22–38
- [25] Piccolroaz, S., Amadori, M., Toffolon, M., Dijkstra, H.A., 2019. Importance of planetary rotation for ventilation processes in deep elongated lakes: Evidence from Lake Garda (Italy). *Scientific Reports* 9.
- [26] Ricciardelli F., 2023. prEN 1991-1-4:2021: the draft Second Generation Eurocode on wind actions on structures - A personal view. *Wind & Structures* 37, 79–94.
- [27] Bruno, L., Coste, N., Mannini, C., Mariotti, A., Patruno, L., Schito, P., Vairo, G., 2023. Codes and standards on computational wind engineering for structural design: State of art and recent trends. *Wind & Structures* 37, 133–151.