

# Caso autostradale di approccio CFD

L'ARTICOLO ILLUSTRA LA VERIFICA DEL SISTEMA DI VENTILAZIONE, PREPOSTO AL RINNOVO E ALL'ESTRAZIONE DELL'ARIA NELLA GALLERIA DI BASE NELLA NUOVA VARIANTE DI VALICO DELL'A1, BASATA SULLA MODELLAZIONE CFD (FLUIDODINAMICA COMPUTAZIONALE). L'ANALISI HA PERMESSO DI INDIVIDUARE UN'IMPREVISTA RIDUZIONE DI PORTATA DEL SISTEMA DETERMINANDO LE CAUSE CHE L'HANNO GENERATA E RENDENDO POSSIBILE LA TEMPESTIVA INTRODUZIONE DELLE MISURE CORRETTIVE.

In questo articolo è presentato il caso di studio di un sistema di ventilazione primaria e l'analisi prestazionale di un sottoimpianto per l'immissione dell'aria di rinnovo all'interno di una galleria stradale. La galleria in oggetto rientra tra gli interventi di maggior rilievo realizzati da parte di Autostrade per l'Italia, nell'ambito del potenziamento dell'autostrada A1, attraverso la costruzione della Variante di Valico; in particolare si tratta dell'opera simbolo della Variante, la Galleria di Base: un tunnel a carreggiate separate lungo circa 8,6 km con sezione media di scavo pari a 180 m<sup>2</sup>, costruito da Todini Costruzioni generali, oggi società del gruppo Salini Impregilo, con l'assistenza impiantistica di IGM Engineering Impianti, società appartenente alla Holding DBA Group. La complessità e le prestazioni richieste al sistema di ventilazione di una galleria stradale crescono proporzionalmente con le dimensioni e quando le lunghezze delle gallerie raggiungono valori considerevoli, è necessario ricorrere a configurazioni impiantistiche molto più articolate rispetto ai normali standard di progettazione. L'impianto di ventilazione in oggetto, è del tipo longitudinale con immissione ed estrazione puntuale nella zona mediana. L'obiettivo dello studio CFD è volto a verificare, in termini prestazionali, il comportamento del solo sistema di rinnovo aria a seguito delle modifiche dei condotti di ventilazione introdotte in corso d'opera. L'analisi prestazionale sarà confrontata con le misure di ventilazione rilevate in campo. Per sviluppare in modo corretto e proficuo lo studio con l'ausilio degli strumenti di fluidodinamica computazionale si è proceduto alla messa a punto di un modello fluidodinamico implementato nel solutore CFD in modo da consentire una verifica dettagliata del canale di ventilazione così come realizzato. Questa fase pre-

liminare consente di far risaltare i possibili punti di intervento e di sviluppare le proposte di modifica volte al ripristino delle corrette funzionalità del sistema di ventilazione. Una volta apportate le modifiche del caso al modello CFD, sarà possibile, mediante nuova analisi numerica, valutare l'effetto utile introdotto dalle stesse; in questo modo lo strumento CFD viene utilizzato come analisi previsionale e prestazionale senza introdurre alea sui risultati ottenuti, ottimizzando l'esecuzione dell'opera e minimizzando al contempo i costi di ripristino.

## Il progetto

Il progetto impiantistico originale prevede l'installazione di un sistema di ventilazione con rinnovo ed estrazione puntuali realizzata a mezzo di una discenderia di collegamento con la linea. La discenderia, grazie alla presenza di un setto separatore orizzontale e alla presenza al suo interno dell'impianto di ventilazione, garantisce sia le funzioni di rinnovo che di estrazione aria. Un sistema di condotti, dedicati all'approvvigionamento dell'aria fresca dall'esterno e all'estrazione dell'aria viziata, collega la centrale di ventilazione, installata in caverna, con i due forni della linea. I collegamenti ai forni seguono percorsi non rettilinei e spesso tortuosi poiché essi devono aggirare la prima linea (asse nord) prima di giungere all'innesto con la seconda (asse sud). A questo quadro generale di complessità si devono aggiungere le modifiche che, ordinariamente, si determinano nel corso della realizzazione dell'opera. La canalizzazione di mandata dell'aria di rinnovo al fornice sud è quella che, in fase costruttiva, ha subito le maggiori modifiche; in particolare quelle di maggior rilievo per l'efflusso sono quelle dovute alla realizzazione di alcuni manufatti per il trasporto

**Francesco Devia**  
Università degli Studi di  
Genova-DIME

**Nicolò Faggioni**  
Imgeco Srl

**Enrico Franzese**  
IGM Engineering Srl

**1. Curva caratteristica del ventilatore ZVN 1-28-400/6****2. Rappresentazione geometrica del modello di calcolo 3D****3. Modellazione solida dello stato di fatto rilevato: in evidenza le riduzioni di sezione in corrispondenza dei nodi**

dei cavi di energia, dell'impianto antincendio e dell'impianto di ventilazione delle vie di esodo. Per il sistema di aria di rinnovo è prevista una installazione ridondante di due ventilatori (uno di riserva all'altro) installati al piano inferiore della centrale di ventilazione. Le portate nominali di rinnovo aria, fissate a progetto per ciascun fornice, sono pari al valore di 220 m<sup>3</sup>/s e le relative pressioni statiche richieste al sistema di ventilazione sono pari a 600 Pa. La portata di progetto di rinnovo (in ciascun fornice) deve essere assicurata dal funzionamento di un solo ventilatore mentre il secondo ventilatore può costituire un'utile riserva in caso di anomalie o malfunzionamenti.

Sulle specifiche del progetto sono stati eseguiti gli approvvigionamenti dei materiali in particolare dei ventilatori e pertanto ad oggi nella centrale di ventilazione aria fresca (nel seguito CDV-AF) risultano installati due ventilatori assiali monostadio Zitron ZVN 1-28-400/6 del diametro girante 2.800 mm e po-

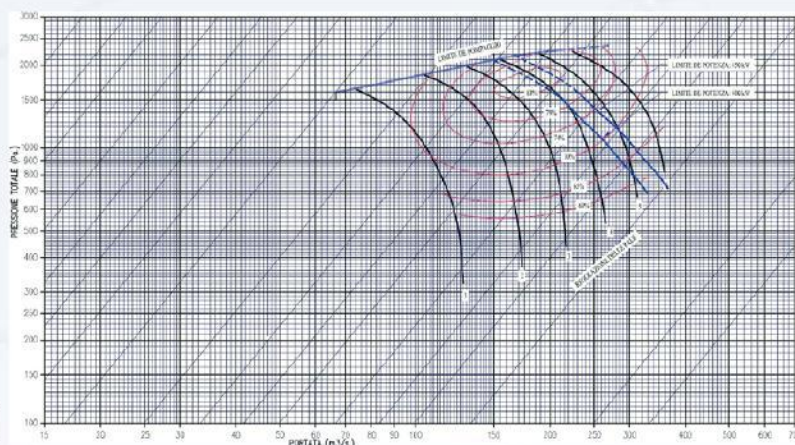
tenza motore 400 kW accreditati di una portata nominale di 220 m<sup>3</sup>/s a una pressione totale di 1.400 Pa (cui corrispondono i 600 Pa di pressione statica richiesta - vedi fig. 1).

**Condotto aria di rinnovo, direzione Sud**

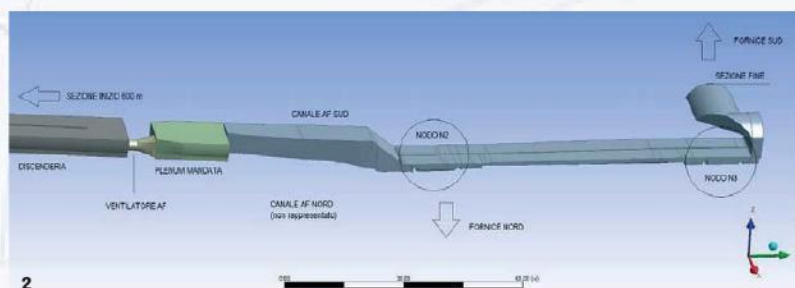
Il condotto di aria di rinnovo per il fornice principale, direzione Sud, è quello che, di per se stesso, presenta le maggiori complessità di forma, ed esse sono concentrate nelle parti evidenziate (NODI) in fig. 2; all'interno del condotto, e soprattutto in corrispondenza dei nodi, sono stati eseguiti interventi che ne hanno cambiato il profilo e la sezione. Per tutti questi motivi, l'attenzione è stata focalizzata sulla disamina del solo percorso aria fresca Sud (nel seguito AF Sud) compreso tra la sezione di aspirazione dell'aria esterna, ubicata in sommità alla discenderia, e la sezione di mandata dell'aria di rinnovo in canna sud delimitata dalla sezione terminale del relativo solaio sospeso. Le sezioni verranno nel seguito indicate più semplicemente come sezioni rispettivamente di INIZIO e FINE che delimitano il campo di verifica.

**Stato di fatto delle opere**

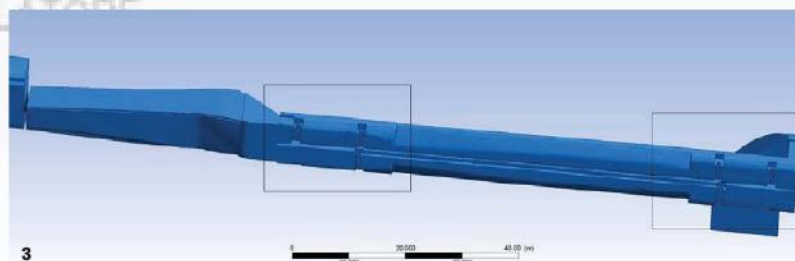
Lo stato di fatto delle opere così come realizzate è stato desunto dagli elaborati grafici relativi al rilievo *as built* tridimensionale realizzato con tecnologia laser scanner. La tecnologia di rilievo laser scanner consente precisione di misura anche su manufatti di grandissime dimensioni, pur richiedendo un delicato lavoro di postprocessing e di elaborazione delle forme per rendere gestibile, in ambiente CFD, l'enorme mole di dati fornita. Alla fine del processo di adattamento, il confronto tra la soluzione di progetto e quella rilevata tramite laser scanning consente la rilevazione e l'analisi di eventuali difformità. In particolare, gli elaborati grafici del rilievo evidenziano una differenza sostanziale tra il progetto e lo stato delle opere così come realizzate. Le difformità sono relative essenzialmente alla geometria dei nodi N2 e N3 e alla geometria del condotto AF Sud nel passaggio sotto il by-pass. Dal confronto tra le soluzioni emerge che (dalle verifiche effettuate sulle sezioni del tratto di condotto compreso tra N2 e N3) l'altezza fra il solaio e l'arco rovescio, misurata in corrispondenza della parete centrale e di quelle laterali, risulta inferiore a quella stabilita nel progetto approvato. Il rilievo ha evidenziato anche la presenza, lungo tutto il percorso di attraversamento sotto le linee, di discontinuità geometriche puntuali rappresentate dalla presenza delle canalizzazioni cavi, dei relativi pozzetti rompitratta e dell'idraulica di galleria. Nei tratti sottostanti i lati marcia dei due fornici, in corrispondenza degli innesti ai suddetti nodi, sono inoltre presenti gli attraversamenti delle tubazioni antincendio in polietilene e lo stacco della tubazione in polietilene strutturato per l'alimentazione dell'aria di rinnovo al by-pass pedonale centrale. Si può osservare che queste difformità si trovano in corrispondenza di punti critici per l'efflusso dell'aria di rinnovo, infatti, si nota che il nodo N2 è posto immediatamente a valle di una porzione convergente del condotto mentre il nodo N3 si trova immediatamente a monte del gomito che conduce il canale verso l'alto nella zona di immissione nella canna Sud. In tali condizioni, l'entità dell'effetto generato sull'efflusso dalle difformità di profilo e di sezione non è facilmente quantificabile con i comuni strumenti analitici per il calcolo delle perdite di carico e è utile avvalersi di un'analisi CFD.



1



2



3

10.000 (m)

7.500

## Analisi del modello geometrico dello stato di fatto

Lo stato di progetto iniziale e lo stato di fatto rilevato, sono stati messi a confronto tramite simulazione numerica con tecnica CFD. Alla base della simulazione numerica sta la modellazione solida del condotto di ventilazione, che nel caso dello stato di fatto, è rilevato direttamente dalla scansione 3D eseguita con tecnologia laser. I modelli comprendono l'intero condotto di ventilazione AF Sud tra l'apertura di aspirazione in sommità alla discenderia e la mandata terminale del condotto in linea per una lunghezza complessiva di circa 700 m. In figg. 4 e 5, per agevolarne la rappresentazione, è stato riportato un estratto del modello rappresentativo dello stato di fatto compreso tra la centrale di ventilazione e i nodi N2 e N3. Uno dei passi preliminari per svolgere un'analisi CFD è quello di sviluppare la modellazione solida del dominio fluido del canale di cui si vogliono valutare le prestazioni. In questo caso particolare, questa fase è stata particolarmente facilitata dall'esistenza del modello solido di progetto e dal fatto che la scansione laser ha prodotto un modello solido dello stato di fatto. I due modelli geometrici sono importati nel solutore CFD (Ansys Fluent) attraverso il quale vengono risolte, con il metodo dei volumi finiti, le relative equazioni del moto.

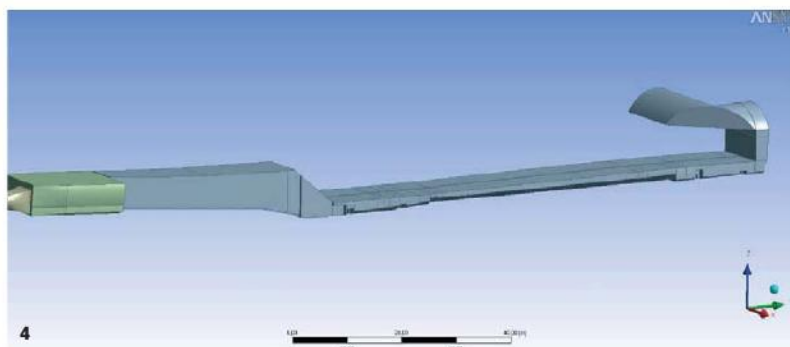
In fig. 5 è riportato anche un estratto della modellazione solida della centrale di ventilazione con uno dei due ventilatori AF. All'interno del solutore è stata impostata la curva prestazionale del ventilatore installato tramite funzione polinomiale del terzo ordine. La curva prestazionale esprime l'effettiva pressione totale resa disponibile dalla macchina al variare della portata d'aria prodotta (o della velocità). In questo modo il solutore CFD determina la soluzione del problema distribuendo lungo il condotto AF Sud la portata corrispondente alla caratteristica del circuito aerale. Attraverso la modellazione del ventilatore è possibile determinare le portate complessive erogate dal sistema nei due scenari rappresentati. La risoluzione delle equazioni del moto consente di ottenere una soluzione completa del campo di moto dell'aria all'interno del dominio di calcolo rappresentato e consente di stabilire se quanto realizzato è conforme, in termini di portata (e di conseguenza anche di pressione), agli standard richiesti dal progetto di variante. In via generale, la soluzione analitica di un problema pressione-portata può essere ottenuta tramite la formulazione generale di Bernoulli dove il coefficiente di attrito  $f$ , tra l'aria in moto e il suo contorno, è espresso attraverso la formulazione di Colebrook-White:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \left( f \cdot \frac{L}{D} + \sum_i k_i \right) \quad 1$$

dove:  $v$  è la velocità dell'aria nel condotto;  $\rho$  è la densità dell'aria;  $L$  è la lunghezza del condotto.

La caduta di pressione sul flusso d'aria è direttamente proporzionale al quadrato della velocità dell'aria nel tratto di condotto considerato ed alla somma di due fattori, rispettivamente:

- Il prodotto del fattore di attrito  $f$  per il rapporto tra la lun-



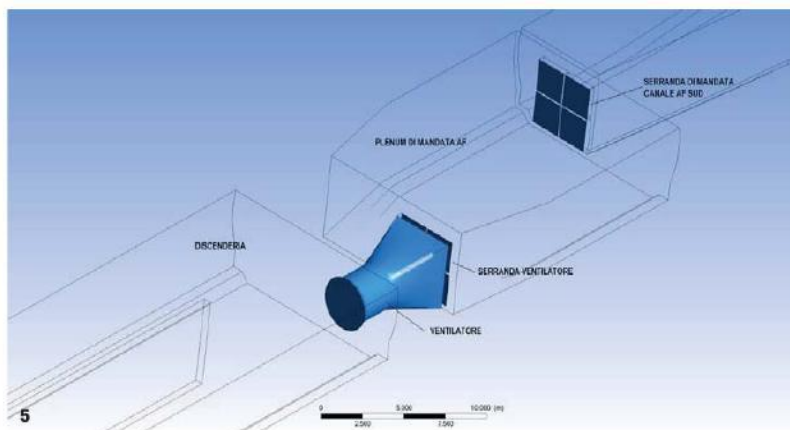
ghezza del tratto di condotto  $L$  ed il suo diametro idraulico  $D$ ;

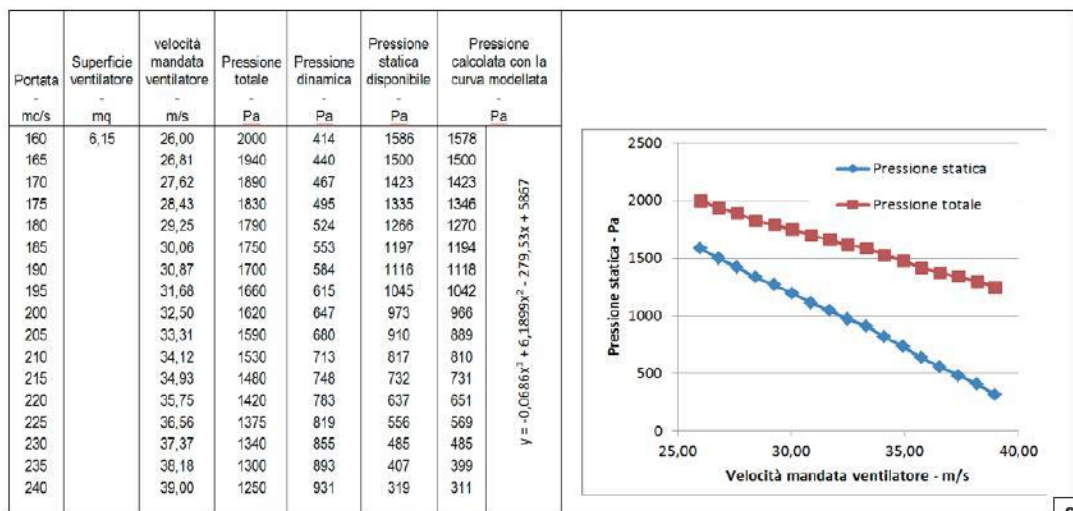
- La sommatoria di tutti i coefficienti di perdite di carico concentrate  $k_i$ , dovuti alle discontinuità geometriche presenti lungo il tratto di canale interessato (quali per esempio innesti, bruschi allargamenti e restringimenti, imbocchi, eccetera).

Le effettive condizioni di portata sono date dalla risoluzione del sistema di equazioni. In tal caso viene determinata la portata totale che può generarsi all'interno del condotto per effetto della spinta prodotta dal ventilatore. Per facilitare la risoluzione del problema e agevolare il compito del solutore CFD, il modello rilevato tramite scansione laser è stato semplificato eliminando dalla forma del canale gli oggetti e i dettagli che presentano dimensioni trascurabili rispetto alla dimensione caratteristica della sezione dell'intero condotto. Poiché la dimensione caratteristica è dell'ordine di alcuni metri (pari al diametro idraulico del condotto), sono stati trascurati dettagli di dimensione inferiore a 15 cm circa (5% della dimensione caratteristica). In un modello di pari dimensioni, questa approssimazione riduce i problemi nella fase di generazione della mesh della geometria e non introduce incertezze rilevanti nel risultato. La generazione della griglia di calcolo ("mesh") è il procedimento che consente la suddivisione del dominio di calcolo, in questo caso rappresentato dall'intero volume d'aria contenuto nel canale AF, in un insieme finito e continuo di volumi elementari chiamati celle. L'insieme delle celle rappresenta la mesh della geometria le cui caratteristiche dimensionali influenzano la qualità, la precisione e l'affidabilità dei risultati ot-

#### 4. Modellazione solida del dominio di calcolo rappresentativo dello stato di fatto rilevato

#### 5. Manufatti per il passaggio delle canalizzazioni elettriche nel condotto AF Sud (vista verso il nodo N2)





6

tenuti. Una mesh accurata presenterà celle di piccole dimensioni e pertanto il solutore dovrà lavorare su un'innumerabile quantità di celle per dare una soluzione al problema; al contrario se il numero delle celle complessivo non è adeguato al problema, anche la soluzione rappresentata potrebbe risultare di scarsa affidabilità.

Per consentire la generazione di una griglia più efficace e contenere il numero complessivo di celle a un valore accettabile e processabile dal solutore, gli elementi aventi caratteristica dimensionale inferiore a 15 cm sono stati eliminati dal dominio. Ciò ha consentito di descrivere l'intero dominio fluido utilizzando complessivamente 2 milioni di celle aventi dimensione variabile comprese tra 10 cm<sup>3</sup> e 100 dm<sup>3</sup>.

Della semplificazione della geometria si dovrà tenere in giusto conto al momento dell'analisi dei risultati.

## Confronto tra il modello di progetto e il modello realizzato

Dall'analisi del modello rappresentativo dello stato di fatto emergono, rispetto allo stato di progetto, importanti differenze sulla geometria dei condotti, in particolare:

- Le differenze piuttosto marcate tra i percorsi di collegamento tra la centrale di ventilazione e il nodo N2, a favore dello stato di fatto;
- Le differenze piuttosto marcate tra le soluzioni adottate per l'innesto al nodo N2 (intersezione condotto linea Nord), a favore dello stato di fatto;
- Le occlusioni e le restrizioni di sezioni all'innesto ed uscita del nodo N2 presenti nello stato di fatto, a favore dello stato di progetto;
- Le irregolarità geometriche dello stato di fatto per il passaggio del canale aria fresca Sud sotto la linea Nord, a favore dello stato di progetto;
- Le occlusioni e le restrizioni di sezioni all'innesto e uscita del nodo N3 presenti nello stato di fatto, a favore dello stato di progetto.

Complessivamente lo stato di fatto prevede, rispetto al modello di progetto:

- Un aumento di sezione trasversale netta del canale AF nel tratto compreso tra la centrale di ventilazione ed il nodo N2 dovuta alla rimozione del locale tecnico al piano strada (ricavato nella sezione di discenderia);
- Un miglioramento della geometria nel nodo N2 all'attacco dell'attraversamento della linea (fornice Nord);
- Una peggioramento del condotto di attraversamento della linea Nord al nodo N2 dovuto alla presenza di manufatti portacavi elettrici ed all'idraulica antincendio;
- Una riduzione della sezione di attraversamento del by-pass dovuta al rialzo della quota di fondo ed alla presenza dei manufatti portacavi longitudinali;
- Un peggioramento del condotto di attraversamento della linea Sud al nodo N3 dovuto alla presenza di manufatti portacavi elettrici.

## Soluzione CFD dello stato di fatto

Ai fini della verifica della correttezza e accettabilità dello stato di fatto delle opere relative ai canali di trasporto dell'aria di rinnovo in canna Sud, nel presente paragrafo si propone di eseguire un confronto tra la soluzione di progetto già verificata mediante analisi CFD, e quella effettivamente realizzata. Per agevolare l'analisi dei risultati sono state introdotte all'interno del dominio di calcolo, alcune sezioni di controllo (a ridosso delle principali discontinuità geometriche) per consentire, nei punti di maggior interesse, di analizzare il campo di moto e l'andamento delle pressioni. Il ventilatore di mandata viene modellato inserendo come condizione al contorno una curva prestazionale in termini di pressione totale e velocità così come rappresentato in fig. 6; la curva è la modellazione della curva fornita dal costruttore per il ventilatore effettivamente installato. Il campo di moto viene risolto considerando la presenza del carico motore inserito in funzione dell'effettiva caratteristica del circuito aeraulico. La curva prestazionale è stata implementata mediante la definizione di una polinomiale di terzo ordine, così come riportato nel prospetto che segue; la curva polinomiale si differenzia dalla curva effettiva per un errore che non supera mai il 3% del valore nominale.

6. Curva pressione-velocità del ventilatore di mandata AF

## Risultati in forma qualitativa

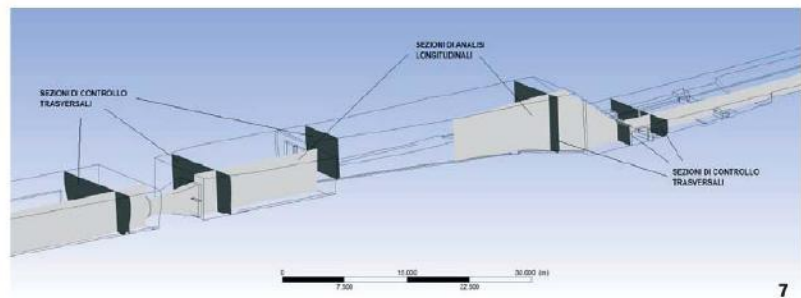
Per esigenze di sintesi riportiamo in questa sede una selezione delle rappresentazioni grafiche dei risultati ottenuti, che comprendono, tra l'altro, i seguenti fattori:

- il dominio di calcolo CFD con le sezioni di controllo trasversali e longitudinali (fig. 7);
- l'andamento delle pressioni statiche sulle sezioni di controllo trasversali (fig. 8);
- l'andamento delle pressioni statiche sulle sezioni di controllo longitudinali (fig. 9);
- il campo di velocità del flusso di ventilazione sulle sezioni di controllo longitudinali e le linee di flusso dell'intero condotto AF Sud (figg. 10 e 11).

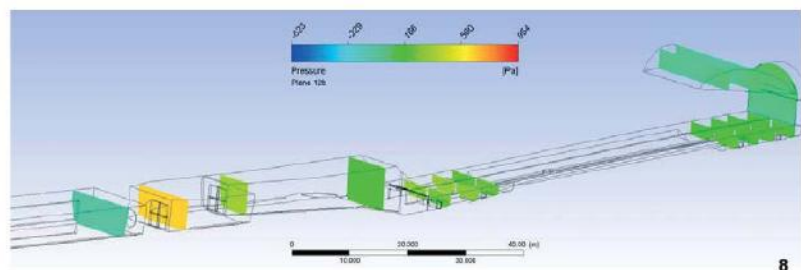
Dall'analisi del campo di moto e delle distribuzioni di velocità e pressione si può osservare come:

- il ventilatore lavora a una pressione statica di circa 1.030 Pa;
- tutto il condotto di discenderia si trovi in depressione per effetto dell'aspirazione del ventilatore;
- che l'intero percorso di aspirazione di lunghezza pari a 650 m, sia responsabile solamente di una caduta di pressione dell'ordine dei 20 Pa;
- che la restante pressione statica disponibile si esaurisca nella rimanente porzione di condotto di lunghezza pari a circa 100 m;
- l'andamento delle pressioni rispecchia l'andamento delle velocità; laddove infatti le velocità sono contenute le perdite di pressione sono altrettanto ridotte, mentre laddove la velocità aumenta anche le perdite di pressione sono più considerevoli. Il tratto del condotto maggiormente responsabile della caduta di pressione è quello compreso tra i nodi N2 e N3, laddove il flusso attraversa il by-pass di collegamento tra i fornicci. Le intersezioni dei nodi sono i tratti che presentano il maggior numero di discontinuità geometriche e nella sola lunghezza di 50 m si perdono quasi 300 Pa di pressione; dopo l'attraversamento sotto pavimentazione del fornice Sud, il flusso di ventilazione, ancora perturbato, risale in calotta all'interno di una sezione di allargamento prima di essere immesso nelle linee.

L'analisi dell'andamento delle pressioni statiche e delle linee di flusso evidenziate nelle figure precedenti descrivono la presenza di alcuni punti singolari in cui sono localizzate elevate cadute di pressione associate e presenti zone di grande vorticosità del moto fluido. In alcuni casi, come nel plenum a valle dei ventilatori, ciò è inevitabile ed è intrinseco alla funzione propria del tratto di condotto preso in considerazione. In altri casi, le cadute di pressione e le vorticosità sono generate da



7



8

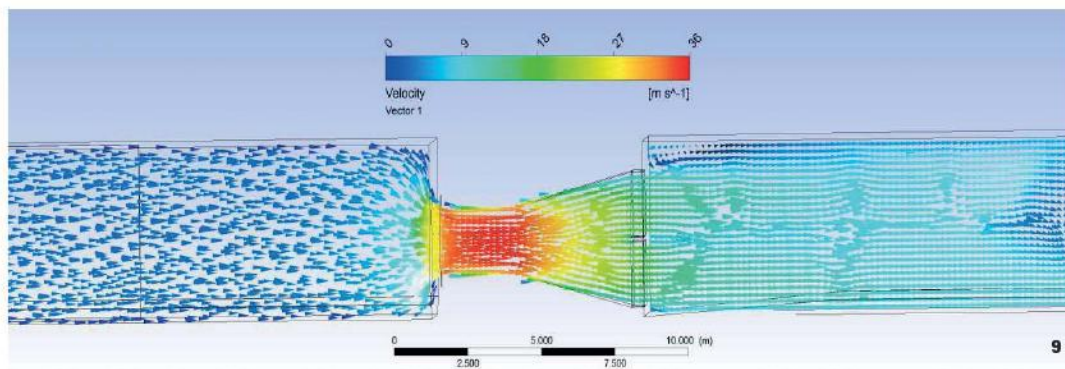
discontinuità di forma o di sezione che non hanno alcuna funzione o che non sono state previste nel progetto.

A titolo cautelativo le verifiche CFD sono state eseguite nell'ipotesi di funzionamento peggiore per il sistema aeraulico, vale a dire in caso di malfunzionamento elettrico di uno dei due ventilatori. In particolare si è ipotizzato l'approvvigionamento di aria fresca da parte del ventilatore installato meno favorito e pertanto si denota il flusso turbolento originato all'interno del plenum di mandata per il disassamento del diffusore rispetto alla serranda di regolazione.

Per quanto riguarda portata e pressione, dai risultati delle simulazioni CFD, relative allo stato di fatto, emerge che:

- la portata totale prodotta dal ventilatore è pari a 185 m<sup>3</sup>/s;
- la pressione totale prodotta dal ventilatore è pari a 1700 Pa.

Dal confronto tra le portate calcolate nel modello di calcolo e quelle dichiarate e verificate in sede di progetto di variante emerge una differenza consistente: rispetto ai 220 m<sup>3</sup>/s nominali richiesti dal progetto della ventilazione lo stato di fatto presenta, stando alle risultanze dell'analisi CFD, una diminuzione di portata dell'ordine dei 35 m<sup>3</sup>/s pari al 16% del valore nominale richiesto.



7. Sezioni di controllo del dominio di calcolo

8. Andamento dei vettori velocità lungo le sezioni di analisi longitudinali verticali (m/s) - Particolare del ventilatore

9. Linee di flusso del campo di moto colorate con il variare della velocità (m/s)

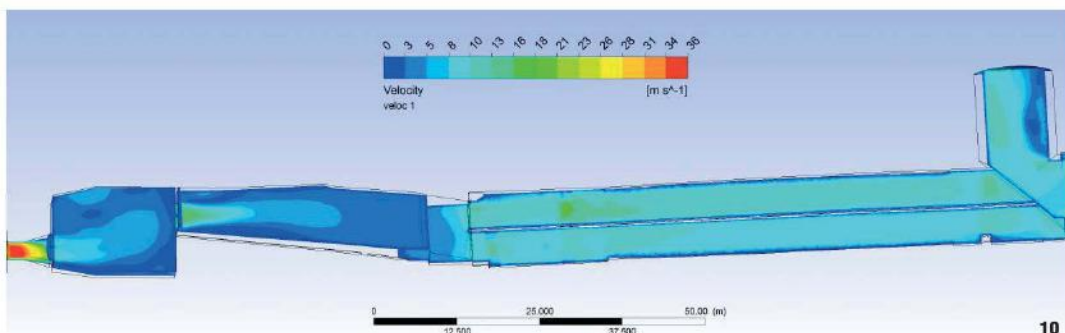
## Misure strumentali

Al fine di verificare l'effettiva rispondenza delle soluzioni trovate con il solutore CFD sono state condotte, in sito, le misure di portata/velocità all'interno del condotto AF Sud. Le misure sono volte a validare lo studio CFD relativo alle analisi fluidodinamiche eseguito sullo stato di fatto e in senso più esteso a validare la metodologia di verifica adottata. In questo modo trovano riscontro e conferma anche le analisi relative alle proposte migliorative riducendosi l'incertezza circa l'affidabilità dei risultati. Le misure hanno riguardato la sola verifica di portata del condotto AF Sud con un solo ventilatore in esercizio (condizione di progetto). Le verifiche sono state eseguite tramite misura della velocità in punti prestabiliti, tramite l'utilizzo di un anemometro a ventolina.

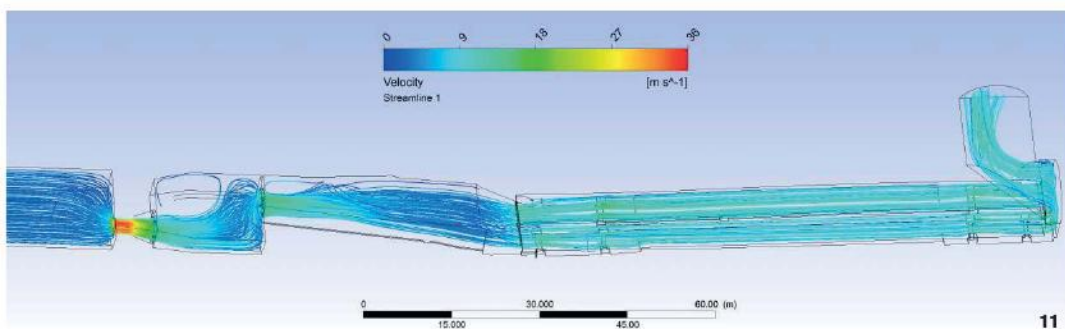
L'esito delle prove ha dato come risultato la misura di  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ , rilevati nella sezione corrente di discenderia 100 m a monte del ventilatore. Si ricorda che nel modello dello stato di fatto utilizzato per il solutore CFD non sono rappresentati le tubazioni dell'impianto idrico antincendio, le passerelle elettriche e le tubazioni idrauliche in genere (forme con dimensioni dell'ordine dei 100-200 mm) e pertanto l'analisi è suscettibile di un errore (seppur minimo) di calcolo intrinseco. Da qui si giustifica la differenza, modesta, tra i risultati calcolati e le misure effettuate in campo.

## Osservazioni conclusive

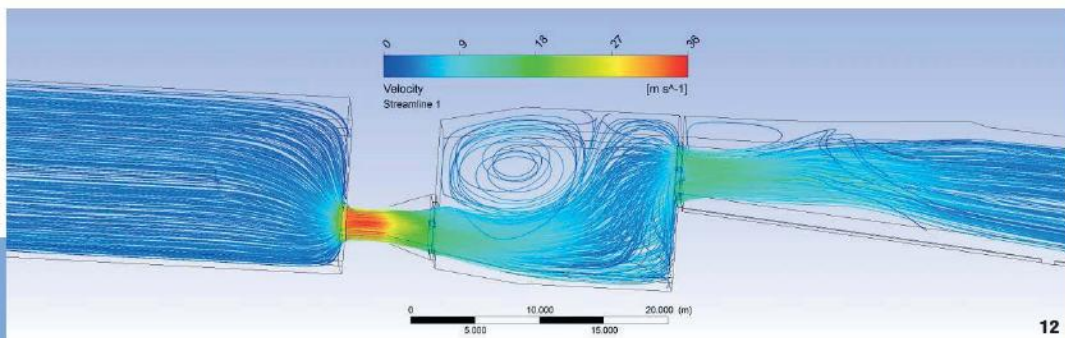
Il sistema di ventilazione di grandi gallerie stradali è una combinazione complessa di canali di forma non comune e di ventilatori di elevatissima potenza. La realizzazione di tali manufatti è determinata, da un lato, da vincoli progettuali che impongono, ai condotti di ventilazione, forme e percorsi intricati attorno all'opera principale, e dall'altro, dalle esigenze costruttive che portano a più o meno grandi difformità rispetto all'ipotesi progettuale originale. Le prestazioni dell'impianto di ventilazione sono una funzione complessa della potenza dei ventilatori e della forma dei condotti: è possibile rilevare la portata effettiva di un impianto da misure anemometriche sul campo, in fase di collaudo o di pre-collaudo. Tuttavia le misure anemometriche e di portate e la rilevazione di una eventuale inadeguatezza dell'impianto alle specifiche di progetto non forniscono una indicazione diretta sul dettaglio delle cause che determinino superiori perdite di carico né permette di valutare l'efficacia di possibili interventi correttivi. In questo caso particolare, l'analisi CFD ha permesso di individuare la causa predominante dell'imprevista riduzione di portata nella conformazione realizzativa di due zone ristrette del condotto di ventilazione e ha reso possibile la valutazione dell'efficacia di possibili interventi correttivi. ■■



10



11



12

10. Andamento delle velocità (valore ass.) lungo la sezione di analisi longitudinale orizzontale (m/s)

11. Linee di flusso del campo di moto colorate con il variare della velocità (m/s)

12. Particolare linee di flusso all'interno del plenum di mandata