



La Zitron ed il Centro Prove e Ricerche sulla ventilazione più moderno al mondo

RENDIMENTO, SICUREZZA ED EFFICIENZA NEI MODERNI IMPIANTI DI VENTILAZIONE

Massimiliano Bringiotti*
Justo Suarez**
Gianpiero Parodi***

Sempre più, gli impianti di ventilazione rappresentano elementi strategici sia per quanto concerne la sicurezza sia per la produttività e l'economicità di servizio, dalla fase costruttiva di un qualsiasi lavoro eseguito in sottosuolo sino alla fase di gestione definitiva dell'opera realizzata.



SA-RC, il primo maxilotto fotografato durante una visita SIG

1. Premessa

Come è stato dimostrato negli ultimi tragici incidenti, l'incendio rappresenta l'emergenza più seria all'interno di un tunnel: è per questo che gli impianti di ventilazione devono essere in grado di lavorare senza problemi in condizioni di temperature estremamente elevate.

Devono pertanto essere progettati e costruiti in accordo a specifiche particolari al fine di sopportare temperature molto elevate e di veicolare fumi densi e corrosivi.

La presente memoria ha, in sintesi, lo scopo di presentare quanto di innovativo, nel settore della ricerca e dello sviluppo in tema di sicurezza, di rendimento e di efficienza degli impianti di ventilazione, sia ad oggi stato realizzato in Spagna dalla Zitron S.A..

Seguiranno anche alcune brevi case history con lo scopo di illustrare quanto di significativo è stato recentemente realizzato in Italia e all'estero.

2. Test eseguibili sui ventilatori

La sicurezza e il comfort all'interno di un tunnel deve essere garantito mantenendo le condizioni ambientali, quali la visibilità, la concentrazione di gas e la temperatura dell'aria, all'interno di determinati limiti. Al fine di ottenere tali condizioni in galleria, normalmente è richiesta l'installazione di impianti meccanici, in particolare di ventilatori.

Un'altra importante funzione dell'impianto di ventilazione è quella legata al suo funzionamento in caso di emergenza, soprattutto causata dalla presenza di un incendio. Il modo migliore di garantire un buon comportamento e un corretto utilizzo in determinate condizioni di un macchinario è quello di provarlo nelle volute condizioni reali di studio di un banco prova.

2.1. Test aerodinamici per i grandi ventilatori assiali

I ventilatori di elevata potenza vengono normalmente costruiti sulla base delle necessità del progetto che li richiede; si parla, infatti, di camini di estrazione dei fumi in ambito minerario (quali il progetto della Irasco di Genova, il Tabash Mine, in cui sono state installate tre stazioni da 2x630 kW) oppure di ventilazione di lunghe gallerie di valico, quali ad esempio il progetto del Gotthard Alp Transit in cui Impregilo all'imbocco ha installato due macchine della potenza di 800 kW.

Infatti, in funzione del dimensionamento impiantistico, dopo avere definito le prestazioni necessarie (prevalentemente in quanto a portata e a pressione d'aria), le Società costruttrici di ventilatori provvedono a progettare la macchina (o la serie di macchine) idonea a quel determinato compito.



Gotthard Alp Transit: la prima fase

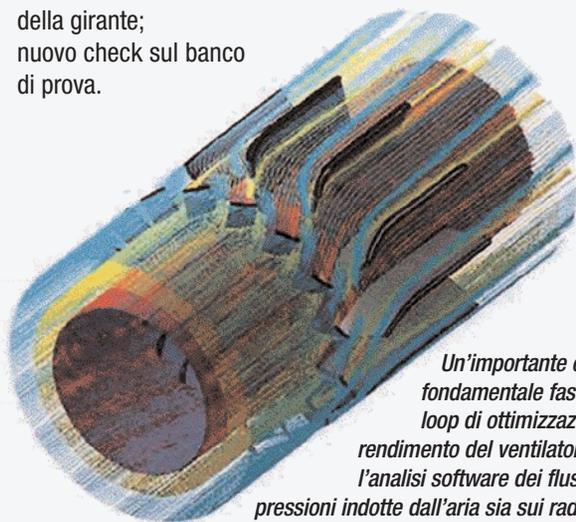
Normalmente la macchina, una volta costruita, viene inviata al Cliente senza avere la possibilità di testarla alla piena potenza, proprio a causa delle difficoltà tecniche dovute alle sue dimensioni, alla potenza installata e alle strumentazioni necessarie per rilevare tutti i dati della curva caratteristica che è stata studiata a “tavolino”.

Solitamente si procede solo a delle prove su modelli in scala oppure facendo funzionare la macchina a regime ridotto ed interpolando i dati che si riescono a rilevare. E' chiaro che costruendo simili attrezzature rimane una “cronica” possibilità di errore, soprattutto legato all'efficienza energetica (e prestazionale) della macchina in oggetto.

Molte volte infatti ci si concentra sul costo di primo acquisto, ma il valore dell'attrezzatura è nullo confronto ad un punto percentuale in più di efficienza; basti pensare che, a parità di prestazioni, utilizzare una macchina da 1.000 kW - che rimane normalmente in esercizio 24 ore al giorno per tutto l'arco dell'anno, in grado di avere una efficienza di un 1% maggiore di un'altra equivalente - comporta un risparmio energetico di circa 88.000 kWh/anno (nel semplice caso di una galleria a doppio fornice, ove sono installate 20 macchine da 50 kW, la cui potenza complessiva è pari a 1.000 kW; il risparmio energetico dovuto all'1% è pari al valore di acquisto di un ventilatore/anno, e se la differenza in efficienza è del 4-5% ...).

La procedura per garantire il massimo rendimento raggiungibile, seguendo i più recenti dettami della tecnica e della scienza applicabile a tale settore, è rappresentata dalle seguenti azioni:

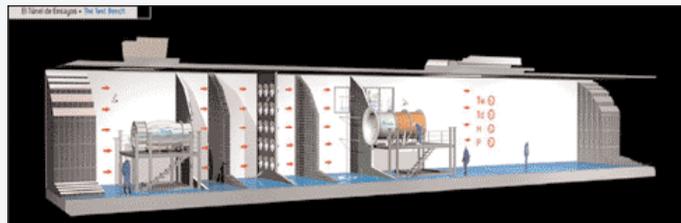
- ◆ dimensionamento della macchina utilizzando idonei sistemi di calcolo dedicati a tal proposito;
- ◆ realizzazione di un modello fisico-matematico aeraulico e suo test virtuale;
- ◆ disegno, scelta dei materiali e costruzione della girante secondo i dati ottenuti;
- ◆ definizione degli ulteriori componenti (motore, cuscinetti, cassa di alloggiamento, cablaggi, silenziatori, appoggi, sistemi antivibrazione, ...);
- ◆ realizzazione della macchina nel suo insieme;
- ◆ test in un banco di prova che sia in grado, regolando la frequenza di alimentazione (sino ad esprimere il massimo della potenza impegnata) e le resistenze del circuito, di restituire tutti i punti di funzionamento in scala reale;
- ◆ verifica e controllo dei dati progettuali;
- ◆ memorizzazione dei dati per l'implementazione successiva del programma di calcolo;
- ◆ eventuale modifica costruttiva della girante;
- ◆ nuovo check sul banco di prova.



Un'importante e fondamentale fase del loop di ottimizzazione del rendimento del ventilatore: l'analisi software dei flussi e delle pressioni indotte dall'aria sia sui raddrizzatori di filetto che sulle palette della girante

Tale metodologia rappresenta un loop operativo che tende chiaramente a ottimizzare la costruzione della macchina e la sua efficienza: rappresenta la garanzia per l'utilizzatore di avere acquistato un prodotto ai massimi livelli tecnologici raggiungibili.

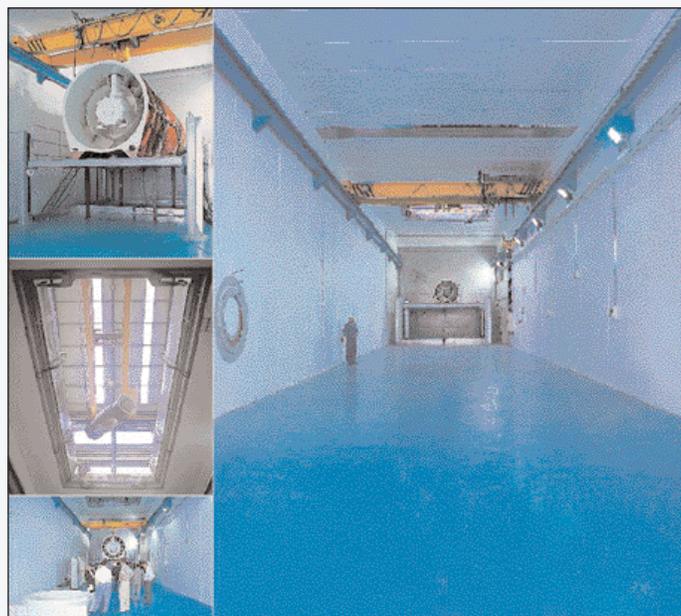
Zitron ha realizzato, a tal scopo, il più grande banco di prova di questo tipo che il mercato mondiale possa offrire; tale struttura è stata certificata dall'AMCA (il più importante Organismo americano internazionalmente riconosciuto) ed è in grado di riprodurre le condizioni operative di qualsiasi situazione reale di un tunnel in fase di scavo; ciò permette la prova di tutti i tipi di ventilatori assiali.



Test bench, L = 100 m, S = 65 m², H = 7 m, test di ventilatori assiali sino a 4 m di diametro e 1,6 MW di potenza

I dati di seguito riassunti riflettono alcune delle caratteristiche principali di tale installazione:

- ◆ è una struttura sotterranea in calcestruzzo armato, avente un volume di 5.145 m³;
- ◆ è un bunker lungo 100 m, alto 7 m e di sezione pari a 52,5 m²;
- ◆ è stato realizzato al di sotto del centro produttivo; una piattaforma mobile e idonei carri ponte sono in grado di posizionare le macchine che devono venire testate in assoluta sicurezza ed efficienza;
- ◆ si possono provare macchine sino a un diametro di 4 m;
- ◆ sino a 1.600 kW di potenza, da 380 sino a 6.600 V;
- ◆ è installata una apposita centrale di alimentazione, munita di variatori di frequenza (50-60 Hz);
- ◆ le procedure di test sono totalmente automatizzate ma la prova è seguibile e controllabile da una centrale di comando posta all'esterno del bunker;
- ◆ la portata è misurata tramite 30 aperture da 400 mm regolabili; ciò permette anche le misurazioni, tramite 16 apposite prese, delle pressioni statiche e delle pressioni differenziali.



Una visione d'insieme



- ◆ idonei raddrizzatori di flusso permettono di ottenere una portata stabile, eliminando le turbolenze;
- ◆ sono stati previsti anche idonei sistemi di abbattimento e/o verifica del rumore indotto dalla macchina in prova;
- ◆ un ventilatore ausiliario è installato in prossimità di una estremità del tunnel; i dati tecnici principali sono: 250 kW di potenza, 100% reversibile e 2.600 mm di diametro. Tale macchina serve per simulare, mediante operazioni continue di regolazione del suo funzionamento, le perdite di carico del circuito al fine di poter generare la curva reale di funzionamento della macchina oggetto del test.

2.2. Test di routine sui ventilatori assiali

I test di routine dovrebbero venire eseguiti sempre su ogni macchina prodotta; essi sono importanti non solo per verificare la funzionalità del ventilatore, ma anche e soprattutto per assicurare all'Utente finale il buon funzionamento e la corretta efficienza dell'attrezzatura.

I classici test di routine sono:

- ◆ prove di spinta, finalizzati a verificare il reale impulso generato dalla macchina;
- ◆ prova di sovraccarico; esiste una speciale procedura (e uno speciale banco prova computerizzato) di test effettuata su ogni ventilatore che prevede il funzionamento della girante ad una velocità maggiore del 20% della velocità nominale, per un determinato periodo di tempo (determinato in funzione della tipologia di macchina). Normalmente i ventilatori vengono testati in Zitron al 120% della loro velocità nominale per 20 minuti;
- ◆ prova di vibrazione; dopo la fase di equilibratura della girante (si parla di valori inferiori a 1 g), le macchine, una volta assemblate, sono sottoposte a una prova di vibrazione in grado di verificare che tale livello rientri nei valori prestabiliti.

Tutti questi dati fanno parte del protocollo di qualità identificativo della macchina e la rintracciabilità di ognuna di esse è garantita da opportune punzonature numeriche eseguite sui componenti principali della stessa (principalmente sulla girante e sul motore).



Il banco di overspeed

2.3. Test di prove al fuoco in reali condizioni di incendio

Zitron, in collaborazione con le Autorità regionali Asturiane, con il Governo centrale di Madrid e con la Comunità Europea, ha realizzata un centro prove di incendio unico al mondo.

Tale Istituto, il TST Tunnelling Safety Testing - Centro Experimental "San Pedro de Anes" è gestito da una Società indipendente chiamata Fon-

dazione Barredo ed è in grado di eseguire prove in scala 1:1 di funzionamento di ventilatori in condizioni di incendio reale.

L'investimento ha previsto la costruzione di una galleria artificiale, avente una sezione media pari a 80 m² e una lunghezza di circa 800 m, comprensiva di un falso tetto (per le prove di ventilazione semitrasversale) e di un tunnel carrabile posto al di sotto del piano stradale. Il tunnel artificiale, avente la classica sezione autostradale, si sviluppa all'esterno e rende possibile l'esecuzione di numerosi test sia per quanto riguarda la ventilazione che per quanto riguarda tutti gli impianti di sicurezza che possono necessitare di una reale prova in condizione di incendio (impianti antincendio, sistemi elettrici e di comunicazione, impianti automatici di controllo, ecc.).

Le tipologie di prove effettuabili lasciano spazio solo alla fantasia degli utilizzatori; basti pensare che i Pompieri spagnoli lo usano anche per le loro esercitazioni.

La galleria permette, pertanto, di sperimentare e di verificare su scala reale, in condizioni normali e di incendio, i seguenti principali sistemi:

- ◆ gli impianti di ventilazione;
- ◆ gli impianti di determinazione e di estinzione degli incendi,
- ◆ gli impianti di sicurezza di vario tipo;
- ◆ pavimentazioni e vie di corsa;
- ◆ modelli teorici per i calcoli di ventilazione (C.F.D.).

Per quanto riguarda la ventilazione, si possono studiare i principali sistemi attualmente utilizzati al mondo, quali:

- ◆ ventilazione longitudinale;
- ◆ ventilazione reversibile semitrasversale;
- ◆ ventilazione combinata semitrasversale;
- ◆ ventilazione in aspirazione;
- ◆ ventilazione in fase di scavo (cul de sac).

Per chi volesse saperne di più, consigliamo di visitare il sito www.tunneltest.com.

2.4. Test di funzionamento a temperature di incendio

Ulteriore argomento è rappresentato dalla prova dei ventilatori in fase di funzionamento in presenza di:

- ◆ elevate temperature nell'intorno della macchina, test che si esegue sui classici jet fan utilizzati per la ventilazione delle gallerie in fase di esercizio (posti in calotta longitudinalmente alla via di marcia);
- ◆ elevate temperature dei fumi veicolati, test che si esegue sulle macchine adibite alla aspirazione dei fumi provocati dall'incendio (classiche macchine installate nei camini di ventilazione delle metropolitane).

Dal punto di vista normativo le prove che vengono richieste devono generalmente garantire il funzionamento della macchina, mantenendo le prestazioni di progetto, soddisfacendo uno dei tre seguenti range operativi:

- ◆ 200°C per due ore;
- ◆ 250°C per due ore;
- ◆ 400°C per due ore.

Di seguito si descrive, in sintesi, una prova standard per il caso "più semplice"; tali test vengono eseguiti nel Centro Sperimentale di cui sopra.

2.5. L'obiettivo

L'obiettivo di questo test è quello di determinare il comportamento di un ventilatore assiale nella condizione di aspirazione di fumi in caso di incendio.

Il ventilatore proposto per il test viene normalmente utilizzato in condizioni di pompaggio di aria pulita all'interno di una galleria stradale, ferroviaria o metropolitana ma in caso di incendio si deve poter invertire il suo moto di rotazione e la macchina deve essere in grado di aspi-



rare aria calda, fumi e gas velenosi.

I dati principali del test sono:

- ◆ temperatura dell'aria: 200°C;
- ◆ tempo operativo del ventilatore: due ore.

Le caratteristiche del ventilatore sono:

- ◆ Costruttore: Zitron;
- ◆ tipologia: ZVR 1-18-75/4;
- ◆ diametro della girante: 1.800 mm;
- ◆ potenza motore elettrico: 75 kW;
- ◆ velocità di rotazione: 1.500 rpm;
- ◆ le pale della girante sono del tipo reversibile al 100%;
- ◆ il ventilatore può operare in mandata o in aspirazione con un'efficienza pari al 100%;
- ◆ la scatola di giunzione del motore elettrico è installata sulla superficie esterna della carcassa del ventilatore.

2.6. Metodologia e descrizione del test

Il test deve simulare quanto più possibile le condizioni di un incendio reale, pertanto il ventilatore sarà messo in condizione di lavorare seguendo le stesse sequenze a gradini che avvengono durante un evento di incendio reale:

1. un'ora di lavoro in condizioni normali. Il ventilatore pompa aria a temperatura ambiente;
2. la temperatura si incrementa sino a 200°C. Il tempo per raggiungere tale valore è meno di dieci minuti;
3. la temperatura viene mantenuta tra 200°C e 250°C per minimo due ore.

Lavoro a temperatura ambiente

Il ventilatore lavora per il tempo di un'ora pompando aria fresca; il banco di prova deve essere regolato al fine di creare un circuito aperto per l'aria.

Incremento della temperatura

Per aumentare la temperatura sino a 200°C nel centro di prova è installata una apposita centrale termica a gas in grado di elevare la temperatura nei tempi richiesti.

Nello stesso istante in cui i riscaldatori vengono collegati, la configurazione del banco di prova cambia da aperta a chiusa. Prima di collegare i riscaldatori la temperatura dell'ambiente all'interno del tubo di circolazione del banco di prova era di 18,5°C. La temperatura ha raggiunto i 200°C in sette minuti e 30 secondi.



Prove al test bench, IGM di Genova

Mantenimento della temperatura

Una volta che la temperatura di 200°C è stata raggiunta, la temperatura dell'aria all'interno del circuito deve essere mantenuta per due ore nel range di 200-250°C.

Il sistema di controllo della temperatura nei limiti sopra menzionati è stato effettuato regolando la portata di gas ai bruciatori; l'intero ciclo viene comandato e controllato elettronicamente.

2.6.1. I criteri di validazione del test

I risultati del test verranno considerati accettabili solo se il ventilatore sarà in grado di rispettare alcune condizioni meccaniche e aerodinamiche.

Condizioni meccaniche

La struttura del ventilatore, unitamente alla parte elettrica, deve sopportare senza alcuna problematica strutturale o prestazionale l'incremento improvviso di temperatura sino a 200 ° C ed il suo mantenimento per due ore.

Condizioni aerodinamiche

Durante l'intera durata della prova la fluttuazione della portata d'aria del ventilatore deve essere minore del 10%. La portata d'aria all'interno del banco di prova è determinata misurando la differenza tra la pressione totale e quella statica. Queste misure devono essere eseguite quando il circuito è chiuso; la sequenza operativa è la seguente:

- ◆ la prima misura di portata viene effettuata quando il circuito è chiuso ed è operativo alla temperatura ambiente. Questa misura deve essere presa prima che il circuito venga aperto ed il ventilatore incominci a lavorare a temperatura ambiente;
- ◆ una volta che si sono raggiunti i 200°C, la portata d'aria viene misurata ogni cinque minuti durante tutto il periodo di prova (due ore).

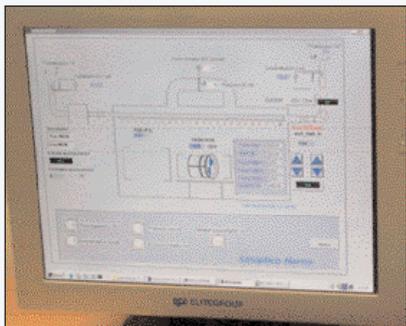
2.6.2. L'equipaggiamento del test

L'equipaggiamento utilizzato per eseguire il test è stato:

- ◆ banco di prova (circuito circolare chiuso in acciaio), provvisto di una valvola esterna di presa (essa rimane aperta per permettere all'aria fresca di penetrare all'interno del circuito durante la prima fase), una valvola esterna di mandata (rimane aperta durante la prima fase e chiusa durante la fase di ricircolazione) ed una valvola a farfalla interna (questa valvola permette di cambiare la configurazione del circuito da aperto, valvola chiusa, a chiuso, valvola aperta). Al fine di evitare elevate turbolenze e facilitare il flusso di aria, i quattro angoli del banco prova sono stati costruiti con strutture aventi profili aerodinamici. Per prevenire perdite di calore il più possibile, la superficie esterna del banco di prova è stata completamente coibentata;
- ◆ bruciatori e centrale di combustione;
- ◆ misuratori di temperatura e sistema di conversione del segnale; normalmente tre sonde rilevatrici di temperature sono connesse al telaio del motore elettrico, altre due dal lato di aspirazione a 150 mm di distanza dalla girante e l'ultima viene installata nel punto di misura di mandata. Le sonde sono termocoppie mediante una tipologia a "T"; vengono collegate ad un personal computer all'interno del quale è installato un convertitore di segnale costruito dalla "Psicologic";
- ◆ tubo di Pitot e manometro digitale; il tubo di Pitot ed il manometro digitale misurano la pressione Totale e Statica; la differenza tra questi due valori rappresenta la pressione Dinamica. Tramite questi valori si può facilmente ottenere, tramite una opportuna formula, la portata d'aria. Il tubo di Pitot viene installato nel circuito del banco prova nella zona opposta all'installazione del ventilatore;



- ◆ analizzatore elettronico "System 3"; questo sistema viene utilizzato al fine di misurare tutti i parametri del motore elettrico (consumo in potenza, intensità di corrente, voltaggio e fattore di potenza).
- ◆ termometro digitale "Kane-May"; viene utilizzato al fine di verificare i dati di misura forniti dalle sonde di temperatura. Il suo range di lavoro è tra 0 e 300°C.



Il controllo ed il monitoraggio del test

2.6.3. I calcoli teorici

Resistenza meccanica della girante

I componenti della girante sono:

- ◆ otto palette in lega di alluminio: la scelta del materiale di costruzione delle palette rappresenta un argomento critico. Questa decisione è stata presa considerando principalmente tre parametri: la forza agente sulla paletta (quando il ventilatore è funzionante si sviluppa una forza centrifuga di circa 7.850 kg); la resistenza meccanica del materiale; l'influenza della temperatura sulla resistenza meccanica del materiale.

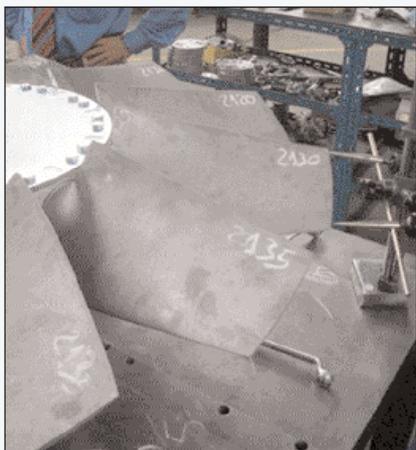
Dopo aver valutato tutti i parametri, il materiale selezionato è rappresentato da una lega in alluminio tipo L2551. Questo materiale presenta una resistenza a trazione di circa 190 MPa e il suo volume rimane costante sino ad una temperatura di circa 200°C.

Al fine di assicurarsi in maniera assoluta in merito alla resistenza meccanica delle palette, due di esse sono state testate a trazione. I risultati del test a trazione sono stati i seguenti:

- ◆ a 20°C di temperatura (temperatura della stanza di prova), il punto di rottura ottenuto nel test è stato a 18.958 kg. Ciò significa un fattore di sicurezza pari ad $\alpha = 2,41$;
- ◆ a 200°C di temperatura il punto di rottura ottenuto nel test è stato pari a 17.571 kg. Ciò significa un fattore di sicurezza pari a $\alpha = 2,23$.
- ◆ a 200°C la dilatazione della lunghezza della paletta è stato pari a 1,5 mm. La lunghezza totale della paletta a 20°C era 456 mm.

In seguito, è stata effettuata una simulazione semplificata al computer, al fine di calcolare l'allargamento della zona terminale delle palette causata dalla forza centrifuga originata dalla rotazione a 1.500 rpm. Il risultato della simulazione ha fornito un valore pari a 0,6 mm.

- ◆ mozzo in acciaio: il mozzo della girante è stato studiato da un punto di vista meccanico utilizzando un programma agli elementi finiti chiamato ANSYS versione 5.5.1. La rete di calcolo presentava 16.016 elementi solidi. L'elemento solido era del tipo "Solid 95" (esaedro da 20 nodi). Questa configurazione garantisce un numero totale di nodi pari a 99.352 con 292.584 gradi di libertà.



La calibratura delle pale della girante

Il materiale utilizzato per la costruzione del mozzo della girante è stato una lamiera in acciaio speciale definito AE 275B. Le caratteristiche meccaniche di questo materiale a 200°C sono:

- ◆ limite elastico (E): $1,95 \times 10^{11}$ N/m²;
- ◆ coefficiente di Poisson (ν): 0,3;
- ◆ coefficiente di dilatazione: $0,12 \times 10^{-4}$ °C⁻¹.

Lo studio agli elementi finiti era focalizzato per ottenere la dilatazione totale del mozzo della girante, tenendo in conto l'influenza di due parametri aggiuntivi: l'aumento della temperatura sino a 200°C e la forza di trazione generata dalle palette sulla superficie esterna del mozzo. Il risultato dello studio ha mostrato una deformazione massima di 2,9 mm sul diametro del mozzo, il che significa una deformazione di 1,45 mm sul raggio. In accordo con i risultati trovati, l'allungamento totale delle palette in fase di rotazione a 1.500 rpm a 200°C è: $L_t = 1,5 + 0,6 + 1,45 = 3,55$ mm. Siccome la deformazione della carcassa della girante non può venire presa in considerazione, poiché la forza di tenuta dei bulloni di serraggio ed altri fattori non permettono deformazioni significative, la distanza minima che bisogna mantenere tra le palette e la carcassa deve essere pari a 3,55 mm.

Il sistema per ottenere la tolleranza richiesta tra la carcassa e le palette è quello di lavorare a macchina la zona terminale delle palette di un valore pari a circa 4 mm. Pertanto, considerando un diametro interno di 1.800 mm, il diametro finale esterno delle palette deve essere 1,792 mm.

Potere calorifico nel circuito d'aria

La temperatura dell'aria all'interno del circuito, in funzione della metodologia di prova, deve essere aumentata da 20°C fino a 200°C in un tempo massimo di dieci minuti. Prima di eseguire il calcolo teorico del potere calorifico è necessario rimarcare il fatto che a causa di alcuni fattori, molto difficili da quantificare, il reale potere calorifico richiesto presenta una differenza significativa con quello teoricamente calcolato.

Questi fattori sono:

- ◆ con l'incremento della temperatura dell'aria all'interno del circuito di prova aumenta anche la temperatura della struttura in metallo del circuito. Il metallo, però, non raggiunge i 200°C con la stessa velocità dell'aria e la sua progressione di incremento è più irregolare di quella dell'aria;
- ◆ il circuito è esternamente protetto da una copertura termicamente isolante al fine di limitare le perdite di calore, ma, in ogni caso, alcune dispersioni si presentano (attraverso le giunzioni, i piedi di appoggio, le valvole, ecc.) e sono molto difficili da quantificare.

Calcoli teorici

- ◆ riscaldamento dell'aria:

$$V_{\text{air}} = l_t \times A = (9,76 \times 2 + 4,96 \times 2) \times (\pi \times 0,9^2) = 74,91 \text{ m}^3;$$

$$\rho_{\text{air at } 20^\circ \text{C}} = 1,2 \text{ kg / m}^3;$$

$$M_{\text{air}} = \rho_{\text{air at } 20^\circ \text{C}} \times V_{\text{air}} = 89,89 \text{ kg};$$

$$Q_{\text{air}} = C_p \times \Delta t \times M_{\text{air}} = 1,008 \text{ [KJ/}^\circ\text{K kg]} \times 180 \text{ [}^\circ\text{K]} \times 89,89 \text{ [kg]} = 16.309 \text{ KJ.}$$

Considerando che la temperatura dovrà raggiungere i 200°C in dieci minuti, abbiamo:

$$t = 10 \text{ min.} = 600 \text{ s};$$

$$P_{\text{air}} = Q_{\text{air}} / t = 16.309 / 600 = 27,2 \text{ kW.}$$

- ◆ riscaldamento dell'acciaio:

La massa di acciaio presente nel banco prova è pari a circa 9.500 kg, includendo le valvole e i supporti.

$$Q_{\text{steel}} = L_p \times \Delta t \times M_{\text{steel}} = 0,50 \text{ [KJ / }^\circ\text{K kg]} \times 180 \text{ [}^\circ\text{K]} \times 9.500 \text{ kg} = 859.788 \text{ KJ};$$

$$t = 10 \text{ min} = 600 \text{ s};$$

$$P_{\text{steel}} = Q_{\text{steel}} / t = 859.788 / 600 = 1.432,9 \text{ kW.}$$



◆ perdite:

attraverso la copertura isolante (spessa 120 mm) sono presenti alcune dispersioni:

$$P_{\text{leakage}} = A \times \Delta t / R_{\text{to}} = 166,47 \times 180 / 2,20 = 13,6 \text{ kW};$$

$$R_{\text{to}} = 2.20 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W};$$

$$A = 166,47 \text{ m}^2.$$

◆ il potere teorico calorifico richiesto è pari a:

$$P_t = 27,2 + 1432,9 + 13,6 = 1.473,7 \text{ kW};$$

- il potere calorifico totale installato è pari a 407,5 kW;

- le differenze tra le condizioni reali e teoriche del test sono state;

a) la temperatura è stata incrementata da 15,4°C a 200°C;

b) il tempo richiesto per questa operazione è stato 7,5 minuti;

c) quando l'aria all'interno del circuito ha raggiunto i 200°C, la temperatura rilevata del metallo del banco di prova era di 110°C.

2.6.4. Risultati e conclusioni

Dopo l'esecuzione del test si sono ottenuti i seguenti risultati e conclusioni:

- ◆ la temperatura media rilevata durante il test è stata di 231°C. Il punto di lavoro del ventilatore è stato regolato molto vicino al limite di pompaggio al fine di simulare un lavoro nelle condizioni peggiori e più estreme possibili;
- ◆ il motore elettrico e le sue connessioni hanno funzionato perfettamente per tutto il periodo di prova;
- ◆ la dilatazione meccanica dei componenti del ventilatore è stata come da calcoli teorici. Ciò significa che lo spazio radiale tra la paletta e la carcassa è stato al di sotto della tolleranza massima ammissibile;
- ◆ le fluttuazioni di portata sono state inferiori al +/-1,5 % dei valori di portata nominale (misurati all'inizio della prova in condizioni normali). Il criterio aerodinamico di accettazione del test era di mantenere questo valore in un range +/-10% del valore nominale;
- ◆ la conclusione finale è che il ventilatore ha superato in maniera soddisfacente il test per cui è perfettamente utilizzabile per lavorare in condizioni di emergenza in un ambiente sotterraneo aspirando fumi caldi in condizioni di incendio.

La Zitron è una delle poche Società al mondo che ha messo a punto un tale banco prova finalizzato a studiare il reale comportamento di un ventilatore sotto condizioni di temperatura estrema. In funzione delle nuove regolamentazioni europee (alcune delle quali in fase di preparazione) in materia di sicurezza in galleria, Zitron ha progettato e costruito ventilatori che sono stati testati (ed installati) al fine di valutare il loro reale comportamento a 400°C per un tempo di permanenza pari a due ore; sono in corso test di funzionamento a 600°C a due ore e mezzo.

3. Alcune case history di ventilazione in corso d'opera

Rennsteig tunnel (Germania)

Lunghezza: 2 x 7,9 km, monodirezionale

Ventilazione: combinata

Cliente: Siemens

Ventilatori: 54 jet, rev. 100%, 45 kW, Φ 1,2 m, 16 assiali, rev. 100%, 132 kW, Φ 2,5 m

Potenza: 4.542 kW

Note: è il tunnel più lungo della Germania, sono presenti due pozzi di aspirazione, i ventilatori assiali sono isolati termicamente e, in fase di funzionamento, le pale sono regolabili; è stato utilizzato acciaio inox al titanio.



Il sistema idraulico automatico di reversibilità delle pale (Rennsteig)

Tangenziale di Atene (Grecia)

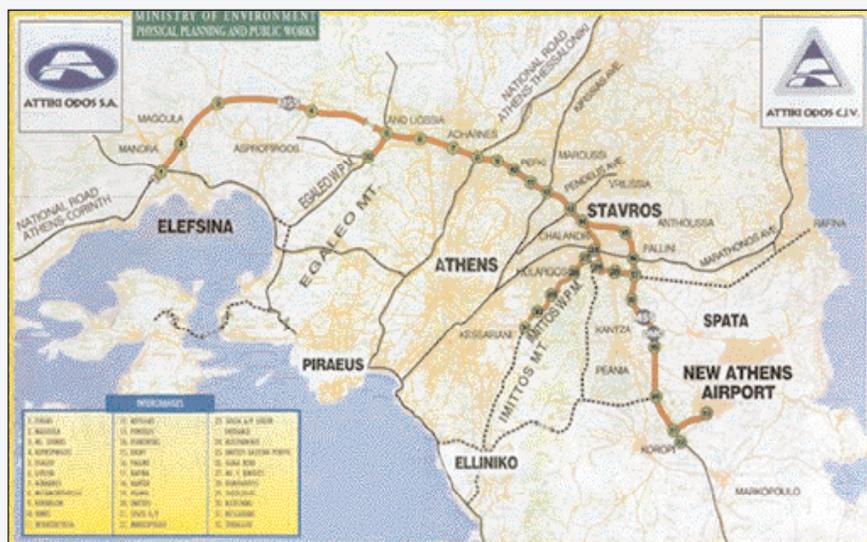
Lunghezza: 10 km di tunnel di varie lunghezze

Ventilazione: longitudinale

Ventilatori: 320 jet fan

Potenza totale: 7.400 kW

Note: lavoro per i Giochi Olimpici 2004



Lay-out topografico progettuale della Tangenziale di Atene

Somport tunnel (Francia)

Lunghezza: 8,6 km, bidirezionale

Ventilazione: semitrasversale

Ventilatori: 12 assiali, rev. 100%, 630 kW, Φ 2,0 m, portata 110 m³/sec., pressione 4.100 Pa

Potenza totale: 6.930 kW

Note: pale regolabili in fase di funzionamento, raddrizzatori filetto regolabili automaticamente



Nel somport: installazione nel camerone di ventilazione

Tangenziale M30 di Madrid (R = 30 km) (Spagna)

Lunghezza: 56 km di tunnel di varie lunghezze

Ventilazione: longitudinale, trasversale e semitrasversale

Ventilatori: 457 jet fan, 400°C, due ore, 416 assiali, sino a Φ 2,8 m, 630 kW

Potenza totale: superiore a 116 MW

Note: previsti anche speciali impianti di filtrazione dei gas aspirati. Lavoro in completamento

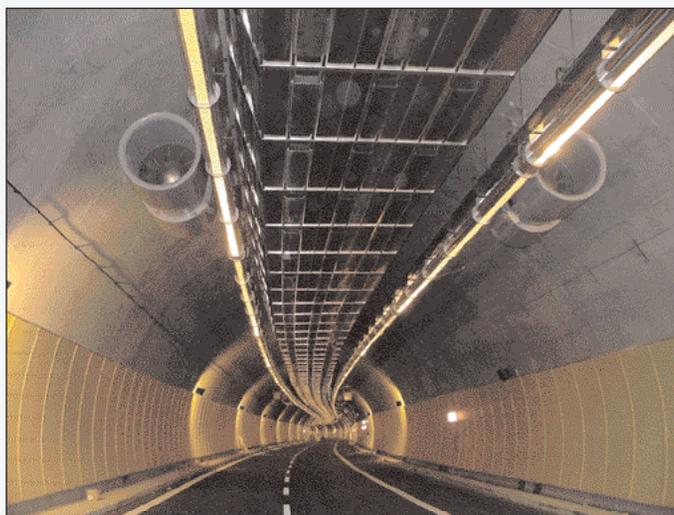
Giovanni XXIII - Passante Nord-Ovest Roma (Italia)

Lunghezza: 3,5 km

Ventilatori: 45 tra ventilatori jet ed assiali

Potenza totale: 1.930 kW

Note: impianti realizzati a tempo record (sei mesi dalla firma all'apertura al traffico, avvenuta il 22 Dicembre 2004). Proprietà del Comune di Roma



La realizzazione della Spic Srl per Astaldi SpA



M30 - Madrid, la nuova tratta si sviluppa per quasi 100 km

Variante di Valico, BO-FI (Italia)

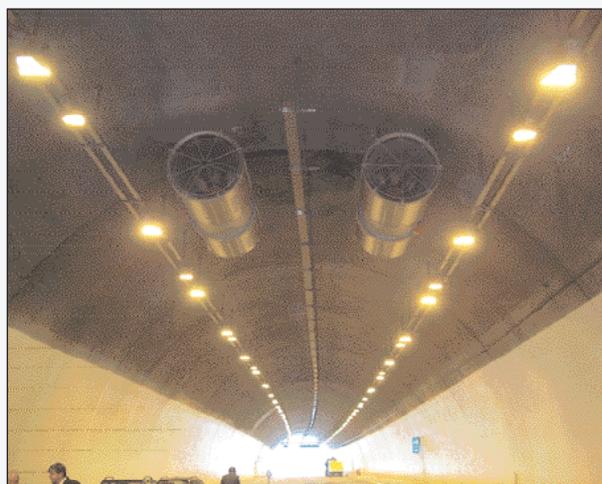
Cliente: Autostrade per l'Italia SpA

Lunghezza: varie gallerie di diverse lunghezze

Ventilatori: 69 jet fan, 37 kW, Φ 1,2 m, 400°C, due ore

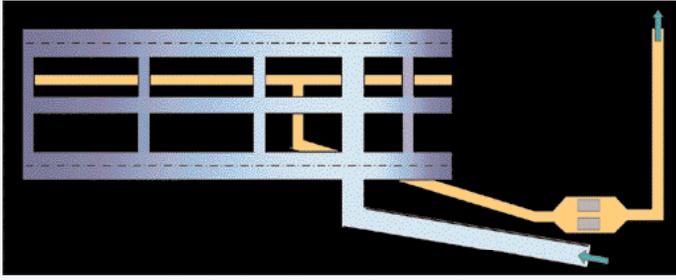
Potenza: 2.553 kW

Note: gli impianti installati in tali gallerie, in generale, rappresentano quanto di più moderno a tema sicurezza sia stato progettato e posto in opera in Italia ad oggi.



La fase di montaggio nella galleria di Sasso Marconi. Il tunnel è stato realizzato dalla CMC di Ravenna

Nel campo degli impianti installati su linee metropolitane, si annoverano i seguenti lavori: metro Ankara, metro Atene, Metro Brasilia, metro Buenos Aires, metro Istanbul, metro Kiev, metro Lisbona, metro Madrid (48 km), metro Milano-Malpensa, metro Monaco Di Baviera, metro Montreal, metro Rennes, metro San Paolo, metro Santiago, metro Taipei, metro Tolosa, metro Valencia.



Lo schema semplificato di funzionamento. La portata al fronte è pari a 300 m³/secondo (Sötschberg)

4. Alcune recenti case history di ventilazione in fase definitiva

Lötschberg Tunnel - Ferden (Svizzera)

Lunghezza: 2 x 35 km

Ventilatori: vari ventilatori assiali sino ad una potenza di 630 kW e diametro 2,4 m

Potenza totale: 3.130 kW

Note: le macchine sono state realizzate in versione antideflagrante

Guadarrama Tunnel (Spagna)

Lunghezza: 2 x 27 km

Ventilatori: gli impianti si intendono per ogni imbocco

- Portale N: quattro macchine da 250 kW, Φ 2 m

- Portale S: sei macchine da 315 kW, Φ 1,8 m

Note: scavo eseguito con quattro TBM (peraltro, Imprese e TBM "in competizione" tra di loro)

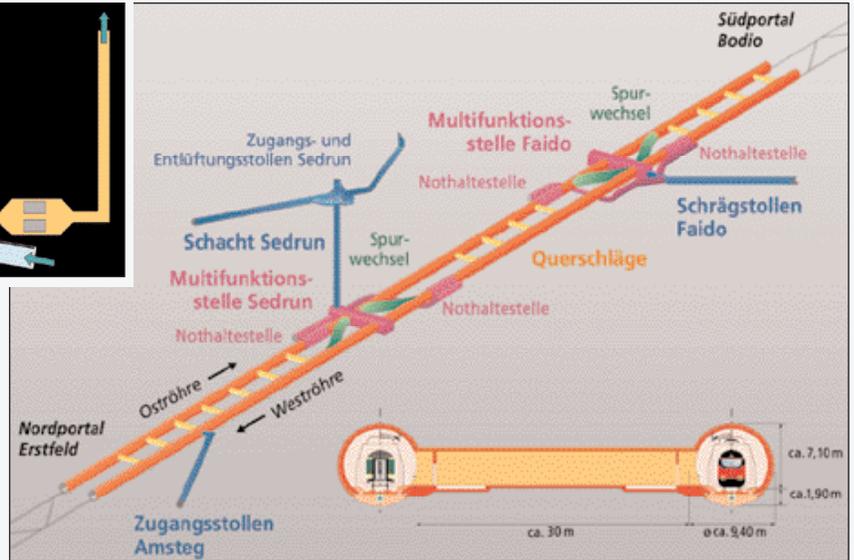
Gotthard Tunnel (Faido e Bodio) (Svizzera)

Lunghezza: 2 x 58 km

Ventilatori: vari ventilatori assiali sino ad una potenza di 800 kW e diametro 2,2 m

Potenza totale: 5.880 kW

Note: sono stati realizzati anche gli impianti di condizionamento in galleria



Lo schema semplificato dell'opera (Alp Transit, Gotthard Tunnel)



L'installazione del booster a due stadi in sezione ristretta

Per quanto riguarda gli impianti idroelettrici, pertanto con analoghe problematiche di necessità di elevate pressioni in piccoli diametri di ventilatori, si annoverano anche i progetti di Tala (Bhutan), Kigi (Turchia), Chamera (India), Oued Chiffa (Algeria), Cariblanco (Costa Rica), Venda Nova (Portogallo),



La fase di installazione della Seli SpA nel tunnel di Guadarrama

Impianto idroelettrico della Val di Susa (TO) (Italia)

Lunghezza: 8 km

Ventilatori: vari ventilatori assiali installati in serie con booster di rilancio; sino a quattro macchine da 75 kW e diametro 1,4 m

Potenza totale: 842 kW in serie

Note: la ridotta sezione di scavo ha necessitato ventilatori di piccolo diametro ma di elevata pressione



Astaldi SpA - Metro Brescia



Conclusioni

La progettazione e le tecnologie costruttive delle gallerie hanno ormai da tempo raggiunto altissimi livelli di qualità, principalmente per quanto riguarda la fase di scavo e quella di sostegno del terreno, che hanno permesso di ottimizzare tempi e costi per la realizzazione delle opere stesse.



I ventilatori principali nella cava di Somincor in Portogallo



Il ventilatore assiale nel tunnel Rennsteig in Germania

Tuttavia non è stato possibile raggiungere equivalenti livelli tecnologico e gestionale di sicurezza che coinvolgessero la prevenzione degli incendi sia dal punto di vista del "fuoco" sia quello della ventilazione e di tutto ciò che vi è collegato (rilevamento dell'emergenza, segnalazioni, evacuazione dei fumi, sistemi di emergenza, materiali, ecc.).

La ragione di questa situazione

è dovuta principalmente al fatto che ogni tunnel è, nonostante una possibile ed esistente classificazione, a sé e che quindi è molto difficile creare un modello predittivo che possa simulare una reale situazione di pericolo.

Per rispondere a queste esigenze, la Fondazione Barredo ha posto come uno dei suoi obiettivi principali la costruzione e la gestione di un Centro per la ricerca sugli incendi e la ventilazione; tale struttura è ubicata presso i tunnel di San Pedro de Anes nella regione delle Asturie (Nord della Spagna). I suoi obiettivi si possono così riassumere:

- ◆ test funzionali sui ventilatori;
- ◆ test operativi su ventilatori normali e speciali;
- ◆ test di verifica dello schema di posizionamento sui Jet-fans;
- ◆ test sulla ventilazione trasversale o semi trasversale.
- ◆ test di resistenza alla fiamma ed alla temperatura:
- ◆ sui ventilatori;
- ◆ su griglie e saracinesche di ventilazione;
- ◆ sui vari sistemi di sicurezza: segnali, controllo, ecc.;
- ◆ sui componenti strutturali: calcestruzzo, ecc.;
- ◆ su coperture e pavimentazioni;
- ◆ su condotte per il fumo.
- ◆ test in situazione di incendio:

- ◆ test sui sistemi di estrazione dei fumi;
- ◆ verifica di modelli numerici per la progettazione degli impianti;
- ◆ test sui sistemi di estinzione dell'incendio;
- ◆ test sui sistemi di allarme ed evacuazione;
- ◆ formazione del personale che opera all'interno ed all'esterno della galleria.

La Fondazione Barredo è, in questo momento, forse l'unico Ente al mondo in grado di testare la sicurezza di un tunnel prima ancora della sua reale messa in esercizio o, addirittura, costruzione vera e propria. ■

* *Dottore Ingegnere ed Amministratore di Geotunnel Srl*
** *Ingegnere e Direttore Tecnico-Commerciale di Zitron S.A.*

*** *Geometra Responsabile Ventilazione Italia di Geotunnel Srl*

Zitron S.A.

La Zitron S.A. è una Società spagnola, situata nelle Asturie, zona che presenta la più elevata concentrazione di miniere in sottosuolo della Nazione.

La Società è presente sul mercato dal dopoguerra ed è specializzata nella progettazione e nella realizzazione di impianti di ventilazione nel settore minerario, nelle gallerie in fase di esecuzione, nel campo della ventilazione definitiva di opere in sottosuolo quali gallerie stradali e metropolitane.

Usufruisce di una superficie coperta pari a 12.000 m² ed una superficie all'aperto pari a 24.000 m². La forza lavoro interna, suddivisa tra Tecnici e operai specializzati, ammonta a più di 140 unità; la divisione Ricerca e Sviluppo consta di 12 Tecnici.

Al 100% di capitale spagnolo, ha costituito anche alcune entità societarie satellite, tra le quali la Zitron Netherlands, la Zitron India Private Limited e la Downunder Australia; è inoltre socia della Korffmann tedesca. Zitron è certificata ISO 9001 dal 1997, ISO 14000, membro dell'AMCA, certificata per la costruzione di ventilatori atti al funzionamento a 400°C di temperatura e certificata per la costruzione di macchine antideflagranti.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Pr EN 12101-3. "Smoke and heat control systems - Part 3. Specification for powered smoke and heat exhaust ventilators".
- [2]. SEDE. 99.1616. "Anexe VII de l'arrete dy 3/08/99", French home affairs Ministry directive.
- [3]. EN ISO 5167-1. "Medición de caudal de fluidos mediante aparatos de presión diferencial", European standard in Spanish version.
- [4]. EN 60034-1. "Maquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento", European standard in Spanish version.
- [5]. Direttiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 Aprile 2004, "Requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea".
- [6]. M. Bringiotti, 1996 - "Guida al Tunnelling, l'Arte e la Tecnica", Ed. Pei, Parma.
- [7]. M. Bringiotti, 2003 - "Guida al Tunnelling, l'Evoluzione e la Sfida", Ed. Pei, Parma.
- [8]. M. Bringiotti, J. Suarez - "Test sui ventilatori assiali in reali condizioni di incendio", Congresso Anim, Perugia, 2002.