

OSSERVATORIO



Necessità e concezione del sistema di raffreddamento sia in fase di scavo che di esercizio nel tunnel di base della nuova linea ferroviaria Torino-Lione

Need and design of the cooling system both in the excavation phase and in the basic tunnel operation phase of the new Turin-Lyon railway line

Dott. Ingg. Paolo POTI^(*), Dott. Ing. Lorenzo BRINO^(**)

1. Introduzione

L'articolo tratta della genesi e dello sviluppo dell'impianto di raffreddamento per il tunnel di base della nuova linea ferroviaria Torino-Lione.

Il dimensionamento di questo impianto rappresenta una particolare applicazione progettuale che nei tunnel ferroviari lunghi e profondi oggi in progettazione o costruzione è sicuramente necessaria in fase di scavo e può rendersi necessaria (in particolari condizioni geotermiche e ambientali) anche in fase di esercizio.

Va precisato che questo articolo cerca di sintetizzare nella maniera più accessibile possibile i complessi studi geotermici e termodinamici effettuati nel corso degli ulti-

1. Introduction

The article deals with the genesis and the development of the cooling system for the basic tunnel of the new Turin – Lyon railway line.

The sizing of this system represents a particular design application that is certainly necessary during the excavation phase of long and deep railway tunnels being designed or built today and that may become necessary (in particular geothermal and environmental conditions) also in the operation phase.

It must be pointed out that this article tries to summarise in the most accessible way the complex geothermal and thermodynamic studies performed during the

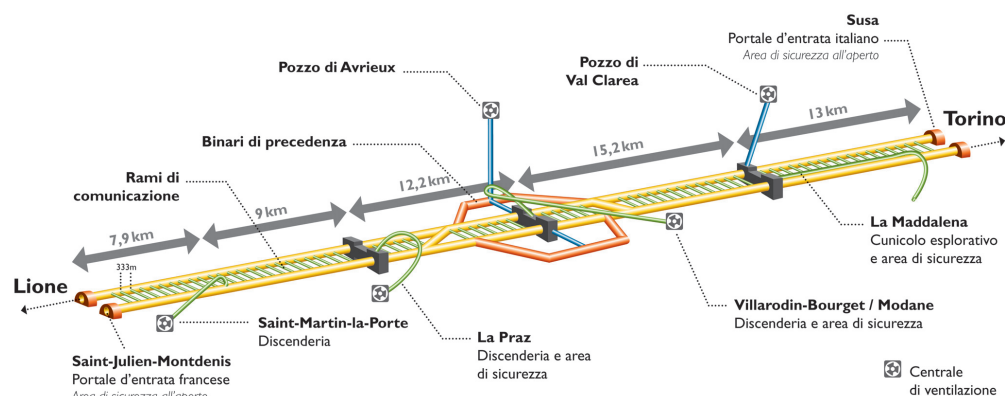


Fig. 1 - Schema del "nuovo" tunnel di Base di 57,2 km e delle principali opere connesse. Diagram of the "new" Basic tunnel of 57,2 km and of the main works connected. (Gangways; Exploration ducts; Connection branches; Shaft; Val Clarea Shaft; Modane bis underground and rescue station; Siding tracks).

(*) Resp. Studi di Sicurezza e Impiantistica - LTF S.a.s.

(**) Dir. Aggiunto Studi e Progetto - LTF S.a.s.

(*) Safety and System Studies Manager - LTF S.a.s.

(**) Studies and Project Assistant Director - LTF S.a.s.

last six years of the project of the international section of the Turin-Lyon route that the Italian-French company Lyon Turin Ferroviaria sas (from hereon "LTF") is in charge of.

In fact, after the review of the Project on the Italian side carried out by LTF during this year, the *basic* cross-border *tunnel* has become over 57 km long (fig. 1), modifying its layout compared to the 52 km of the previous 2006 project, just in the Italian territory.

This has led to a new examination of the input data considered in the previous project phase starting from a new definition of the geothermal profile.

2. Geothermal aspects

The cross-border basic tunnel of the new Turin – Lyon railway line is 57,2 km long and crosses the French-Italian massif of Ambin at a depth that, for a significant part of its layout between Vallon d'Etache and Val Clarea, can reach 2300 m (fig. 2 – left axis).

A first approximation of the rock temperature curve (geothermal profile) is represented in fig. 2 (right axis).

The “modelled” profile part is obtained by interpolating the information from surveys carried out over the years on the exact tunnel route, the “extrapolated” part is instead obtained by processing the data of surveys per-



INGEGNERIA FERROVIARIA

OSSERVATORIO

nuta invece per elaborazione dei dati di sondaggi effettuati in prossimità⁽¹⁾ (e quindi non in corrispondenza) del preciso tracciato del tunnel di base.

Dalla sua lettura è facile ricavare la profondità del tunnel in funzione della progressiva chilometrica per differenza tra la quota orografica del terreno (linea continua in nero) e la quota del tunnel (linea tratteggiata in nero).

Il profilo geotermico di prima approssimazione è stato poi ottimizzato addolcendo le cuspidi ed eliminando le discontinuità teoriche riscontrabili dai dati reali, ottenendo così il grafico di fig. 3.

Tale profilo è stato poi utilizzato per il dimensionamento degli apparati.

Da esso si evince come in corrispondenza della maggior profondità di 2300 m nell'intorno della PK 43+500 la temperatura della roccia è alta e localmente finanche superiore a 45°C.

La fig. 3 mostra nel dettaglio il picco della distribuzione della temperatura proprio in corrispondenza del massiccio d'Ambin (dal km 35 al km 48), evidenziando la soglia dei 30° C fissati in prima battuta dagli studi funzionali di LTF come temperatura di riferimento media per l'aria nel tunnel.

Pertanto la modellizzazione geotermica ha messo in evidenza una zona di circa 13 km lungo il tracciato in cui ci si aspetta che la temperatura naturale della roccia sia superiore ai 30 °C, con un massimo di 47 °C in corrispondenza all'incirca del km 43+500.

Va detto però che molti e complessi parametri intervengono in questo tipo di modellizzazioni: l'influenza della topografia, la conducibilità del terreno, la profondità, l'incertezza geologica, ecc. E' chiaro che essi possono fa-

formed close⁽¹⁾ to the exact basic tunnel route (and therefore non in correspondence).

By reading it, it is easy to work out the depth of the tunnel according to the progressive kilometre difference between the orographic ground altitude (the continuous black line) and the tunnel altitude (the broken black line).

The geothermal profile first approximation was then optimised by softening the cusps and eliminating the theoretic irregularities found in actual data, thus obtaining the graphic in fig. 3.

Such profile was later used for the sizing of the equipment.

From this, one can infer how in correspondence with the greater depth of 2300 m around the PK 43+500 the rock temperature is high and even exceeds 45°C locally.

Figure 3 shows the detail of the temperature distribution peak exactly in correspondence of the Ambin massif (from km 35 to km 48), highlighting the 30°C threshold at first fixed as average reference temperature for air in the tunnel by functional studies performed by LTF.

Therefore, the geothermal modelling has highlighted an area of approximately 13 km along the route where the natural rock temperature is expected to exceed 30°C, with a maximum of 47°C in correspondence of km 43+500 approximately.

It must however be pointed out that many and also complex parameters step in this type of modelling: the topographic influence, the ground's conductivity, the depth, the geological uncertainty, etc. It is clear that they

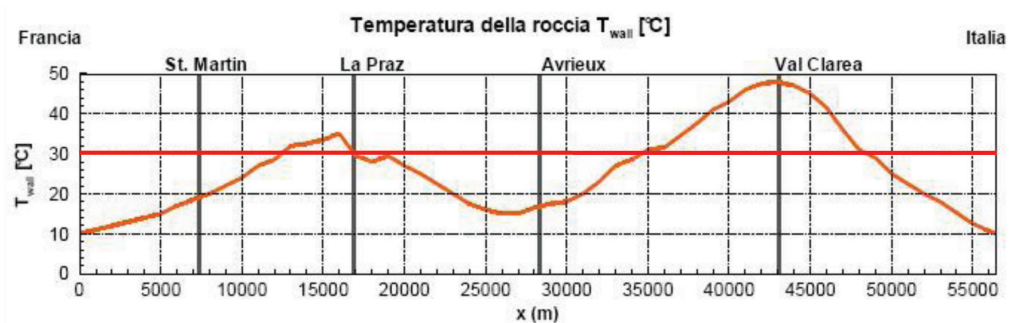


Fig. 3 - Profilo longitudinale di temperatura lungo il tunnel di base ottimizzato. Longitudinal profile of the temperature along the optimised basic tunnel.

⁽¹⁾ Spesse volte l'impervia orografia del terreno non consente il piazzamento della trivella dei sondaggi in corrispondenza del punto ottimale.

⁽¹⁾ The impervious orography of the ground often does not allow the placing of the drill in correspondence of the optimum point.

OSSERVATORIO

cilmente introdurre delle incertezze nella stima del profilo, seppur ottimizzato.

Nonostante tutte le incertezze sopra esposte, il calcolo di previsione risulta sufficientemente affidabile: infatti il modello di calcolo utilizzato per le simulazioni⁽²⁾ ha dimostrato che qualora si sommassero tutte le approssimazioni dovute a ciascun parametro, nella peggiore delle ipotesi l'approssimazione globale sull'andamento della temperatura ottenuto sarebbe dell'ordine di $\pm 4^\circ\text{C}$.

3. Giustificazione della necessità del sistema di raffreddamento e soglie di temperatura da considerare

Le caratteristiche geotermiche del massiccio d'Ambin hanno obbligato LTF, nel corso degli ultimi 13 anni, a realizzare diversi studi allo scopo di valutare la variazione della temperatura dell'aria all'interno del tunnel di base e quindi a giustificare la necessità o meno dell'installazione di un sistema di raffreddamento sia in regime di scavo che di esercizio dell'infrastruttura.

Negli studi di raffreddamento intrapresi per un *impianto di raffreddamento permanente durante l'esercizio ferroviario* questi dati di input sono stati però assunti con una "lieve" approssimazione di base: nei profili geotermici di cui alle figg. 2 e 3 le temperature che vi compaiono tengono conto dell'umidità ambiente laddove i progettisti hanno sempre considerato per i loro calcoli temperature a bulbo secco.

Vediamo come si giustifica questa approssimazione.

L'esperienza dimostra che il livello di umidità in gallerie ben coibentate di lunghezza superiore ai 10 km tende a mantenersi molto debole.

A titolo di esempio, l'aria che inizialmente entrasse in un tunnel di media lunghezza (ma comunque superiore ai 10 km) con grado di umidità pari all'80%, tenderà a seccarsi molto rapidamente e, al centro del tunnel, saranno facilmente riscontrabili valori inferiori al 50%.

Trasponendo queste considerazioni al tunnel di base di oltre 57 km, le simulazioni fatte prevedono che l'aria canalizzata nel tunnel possa nei settori centrali raggiungere valori di umidità finanche inferiori al 30% per qualunque condizione climatica esterna.

Comunque sia all'interno del tunnel di base ci si attende che l'umidità dell'aria sia sempre compresa tra il 30 % e il 40%.

Quanto sopra ha condotto gli esperti di settore a *trascurare la componente umidità* negli studi di dimensionamento degli apparati di raffreddamento una volta completata la galleria (e quindi in fase di esercizio dell'infra-

can easily introduce uncertainties in the profile estimate, although optimised.

Despite all the above-mentioned uncertainties, the forecast calculation appears to be sufficiently reliable: in fact, the calculation model used for the simulations⁽²⁾ has proved that if all approximations due to each parameter were to be summed, the global approximation of the temperature trend obtained would be in the order of $\pm 4^\circ\text{C}$ at the worst.

3. Justification for the need of a cooling system and temperature thresholds to be considered

The geothermal characteristics of the Ambin massif have forced LTF to perform several studies, over the last 13 years, with the aim of evaluating the temperature variation of the air inside the basic tunnel and therefore of justifying the need or not for the installation of a cooling system both under infrastructure excavation and operation.

In the cooling studies performed for a *permanent cooling system during railway operation* this input information was however taken on with a "slight" basic approximation: in the geothermal profiles in figures 2 and 3, the temperatures shown take into account the humidity in the environment where designers have always considered dry bulb temperatures for their calculations.

Let us see how this approximation is justified.

Experience shows that the humidity level in well insulated tunnels with a length exceeding 10 km tends to remain very weak.

By way of illustration, the air initially entering an average long tunnel (but however exceeding 10 km) with a degree of humidity equal to 80%, will tend to dry very quickly and, values below 50% will be easily detectable at the centre of the tunnel.

Transposing these considerations to the basic tunnel over 57 km long, the simulations performed foresee that the air channelled in the tunnel can reach humidity values even below 30% in any external climate condition in the centre sections of the tunnel.

In any case inside the basic tunnel, one expects the air humidity to be always between 30% and 40%.

The above has led experts in the field to *disregard the humidity component* in sizing studies for cooling equipment once the tunnel has been completed (and therefore during the infrastructure operation phase), actually considering dry bulb temperature as temperature reference value.

It is clear that this way an approximation factor is introduced, but it certainly remains lower than 1% against

⁽²⁾ Il software utilizzato per la modellizzazione è "TunClim" di GESTE Engineering.

⁽²⁾ The software used for "modelling" is "TunClim" by GESTE Engineering.

OSSERVATORIO

struttura), considerando di fatto come valore di riferimento della temperatura la temperatura a bulbo secco.

E' chiaro che così facendo si introduce un fattore di approssimazione, ma esso si mantiene sicuramente inferiore all'1% a fronte di un'importante semplificazione dei calcoli⁽³⁾.

Questa "approssimazione" non è invece trasferibile in fase di scavo in cui le venute d'acqua in galleria rendono generalmente l'atmosfera satura di umidità (vedere nel seguito).

Come primo passo si è trattato quindi di definire le soglie limite di temperatura da non superare sia per la fase di scavo che di esercizio, tenendo conto della normativa di legge vigente in Europa, in Italia e in Francia (data la caratteristica transfrontaliera italo-francese del tunnel).

La temperatura da non superare è legata alle condizioni di lavoro delle squadre che intervengono nel tunnel sia in fase di scavo sia durante la manutenzione in fase di esercizio.

A questo proposito esistono leggi e norme appositamente concepite, ovvero:

- a livello europeo, la norma NF EN 27.243 (ISO 7243) fornisce delle soglie indicative di temperatura nell'ambiente di lavoro⁽⁴⁾ modulate secondo il carico fisico medio sviluppato nel lavoratore (in ergonomia si parla di "metabolismo energetico"). A tal proposito la norma prevede un diagramma temperatura/ "metabolismo energetico" (espresso in "W/m²" o in "W", considerando la superficie corporea media di un uomo pari a 1,8 m²) tarato sui carichi di lavoro (fig. 4);
- nel quadro normativo francese (Codice del lavoro) non si prevedono dei valori assoluti da rispettare in funzione di una determinata durata di lavoro ma generalmente si fa riferimento alla norma NF EN 27.243 di cui al punto precedente;
- nel quadro normativo italiano (Decreto 320 del 20 marzo 1956) si ammette, per turni di lavoro non superiori alle 6 ore, una temperatura massima di 30 °C in atmosfera saturata (tasso di umidità > 90 %), e di 35 °C in atmosfera secca, con la possibilità di superamento di tali soglie per operazioni di emergenza legate alla sicurezza delle persone.

⁽³⁾ Senza anticipare le conclusioni e a solo titolo di esempio, per il tunnel di base si è visto che utilizzando come input la temperatura a bulbo umido (UR 40%) si sarebbe ottenuto per lo smaltimento del calore una potenza frigorifera necessaria di circa 15,09 MW a fronte di una potenza frigorifera per temperatura a bulbo secco di 14,94 MW. L'errore introdotto dimensionando l'impianto a 15 MW sarebbe (nella peggiore delle ipotesi) dello 0,6%.

⁽⁴⁾ L'indice empirico WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) riportato in ordinata nel diagramma di fig. 4 combina la misura di due grandezze misurabili: la temperatura umida naturale T_{un} e la temperatura di globo nero T_{g} (misurata secondo specifici criteri all'interno di una sfera nera di 15 cm di diametro posizionata nell'ambiente di lavoro) e che in assenza di irraggiamento solare (come in galleria) risponde alla formula: $T_{WBGT} = 0,7 T_{un} + 0,3 T_g$

an important calculations example⁽³⁾.

This "approximation" is however not transferable during the excavation phase during which water infiltrations in the tunnel generally make the air saturated (see further on).

First of all, it was a case of defining the temperature limit thresholds not to be exceeded both for the excavation phase and the operation phase, considering the laws in force in Europe, in Italy and in France (given the Italian-French cross-border characteristic of the tunnel).

The temperature not to be exceeded is related to the working conditions of the team that operate in the tunnel both during the excavation phase and during maintenance in the operation phase.

In this respect, there are laws and rules specifically conceived, to be more precise:

- at a European level, the NF EN 27.243 rule (ISO 7243) gives the approximate temperature thresholds in the work environment⁽⁴⁾ modulated according to the average physical load of the worker (it is referred to as "energy metabolism" in ergonomics. In this regard, the rule provides for a temperature diagram / "energy metabolism" (expressed in "W/m²" or in "W", considering the average body area of a man equal to 1,8 m²) calibrated on work loads (fig. 4);
- in the French regulatory framework (Labour Code) there are no absolute values provided for to abide to according to a set work duration but reference is generally made to the NF EN 27.243 rule referred to in the previous point;
- in the Italian regulatory framework (Decree 320 dated 20th March, 1956) a maximum temperature of 30 °C in saturated air (moisture content of > 90 %), is allowed for work shifts not exceeding 6 hours and of 35 °C in a dry atmosphere, with the possibility of exceeding such thresholds for emergency operations related to people's safety.

The following was agreed for the LTF project, in compliance with the rules in force:

- that the room temperature at the work site must never

⁽³⁾ Without anticipating the conclusions and by way of illustration, in the basic tunnel case it was seen that using wet bulb temperature (RH 40%) as input, a cooling capacity of approximately 15,09 MW necessary for heat dissipation would have been obtained against a cooling capacity for dry bulb temperature of 14,94 MW. Sizing the system at 15 MW, the mistake introduced would be (in the worst case) of 0,6%.

⁽⁴⁾ The WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) empirical index reported in the diagram axis in fig. 4 combines the measurement of two measurable quantities: the natural wet temperature T_{un} and the black globe temperature T_g (measured according to specific criteria with a 15 cm diameter black sphere placed in the working environment) and that with the absence of solar radiation (as in the tunnel) responds to the formula: $T_{WBGT} = 0,7 T_{un} + 0,3 T_g$

OSSERVATORIO

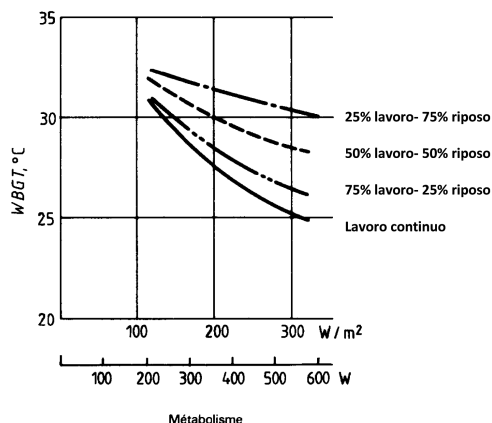


Fig. 4 - Stima dell'impatto termico sull'uomo a lavoro. Estimate of the thermal impact on man at work.

Per il progetto LTF, nel rispetto delle norme in vigore, si è così convenuto:

- che in fase di scavo (con 3 turni di 8 ore al giorno) la temperatura ambiente sul posto di lavoro non superi mai i 26°C in atmosfera umida (UR>70%)⁽⁵⁾;
- che per le operazioni di manutenzione ordinaria in fase di esercizio (prevista quotidianamente per 4 ore in notturna dalle 1h 40' alle 5 h 40'), la temperatura massima ammissibile sia di 32°C a bulbo secco, tenuto conto del tasso di umidità prevedibile generalmente inferiore al 40%.

4. Mantenimento della temperatura in fase di scavo (26 °C, UR>70%)

Oltre alla temperatura della roccia, diversi altri elementi vanno ad influenzare la quantità di calore che deve essere dissipata dal sistema di raffreddamento da prevedere in fase di scavo:

- la fresa (nel proseguo denominata TBM- Tunnel Boring Machine) ove prevista;
- i diversi mezzi e apparati motorizzati (motori diesel, veicoli, ecc);
- il calore di idratazione del cemento;
- il calore liberato durante l'evacuazione del marino;
- l'umidità generata dalle infiltrazioni d'acqua.

⁽⁵⁾ In fase di scavo l'umidità dell'aria può raggiungere valori ragguardevoli, aumentando la quantità di calore complessivo che deve essere sottratto. Il paragrafo seguente analizza nel dettaglio tale problematica.

exceed 26°C in humid atmosphere (UR>70%)⁽⁵⁾ during the excavation phase (with three 8-hour daily shifts);

- that for ordinary maintenance activities during operation (planned for in 4 hours daily at night from 1h 40' to 5 h 40'), the maximum acceptable dry bulb temperature is 32°C, considering the expected humidity generally lower than 40%.

4. Temperature conservation during the excavation phase (26 °C, RH>70%)

Besides the rock temperature, several other elements affecting the amount of heat that must be dissipated by the cooling system must be planned for during the excavation phase:

- the milling cutter (from hereon called TBM- Tunnel Boring Machine) where planned for;
- the various transport means and motorised equipment (diesel engines, vehicles, etc.);
- the cement hydration heat;
- the heat released during the evacuation of waste materials;
- the humidity generated by water infiltrations.

In case of excavation with the TBM, it is obvious that the last one represents by far the most important heat source present in that moment at the excavation front.

However, in an excavation cycle the use of the TBM actually occurs from 30 to 50% of the duration of the whole cycle. The remaining 50/70% of time is taken up by complementary activities to the actual excavation, as for example: the provision of materials, internal movements, the support and strengthening of the tunnel walls, maintenance of the milling cutter, etc.

Taking into account these periods of inactivity of the TBM, the cooling level actually required for each TBM can be calculated granting that the thermal power released by the TBM is half of the expected theoretic one just with the TBM always operating.

Considering that a large size TBM like the one planned for the excavation of the basic tunnel (with approximately a 10 m diameter) releases up to 400 kW of heat in the excavation cycle, the theoretic localised cooling power can be ascribed to approximately an overall 250 kW (200 only for the TBM and 50 for all other listed factors).

In order to maintain the temperature constant at roughly 26°C in the whole tunnel avoiding the concentration of the cooling source in a single area during the ex-

⁽⁵⁾ During the excavation phase the air humidity can reach considerable values, increasing the quantity of overall heat that must be removed. The following paragraph gives a detailed analysis of such problem.

OSSERVATORIO

Nel caso di scavo con TBM, è ovvio che quest'ultima rappresenta di gran lunga la sorgente di calore più importante presente in quel momento al fronte di scavo.

In un ciclo di scavo però l'utilizzo della TBM interviene di fatto dal 30 al 50% della durata dell'intero ciclo. Il restante 50/70% del tempo viene assorbito da attività complementari allo scavo vero e proprio, come ad esempio: l'approvvigionamento dei materiali, gli spostamenti interni, il sostegno e il consolidamento delle pareti di scavo, la manutenzione della fresa, ecc. Tenendo conto di questi periodi di inattività della TBM, il livello di raffreddamento richiesto nella realtà per ciascuna TBM può essere calcolato ammettendo che la potenza termica rilasciata dalla TBM sia la metà di quella teorica attesa con la sola TBM sempre in attività.

Considerando che una TBM di grandi dimensioni come quella prevista per lo scavo del tunnel di base (circa 10 m di diametro) rilascia fino a 400 kW in calore nel ciclo di scavo, la potenza teorica di raffreddamento localizzato può essere ricondotta a circa 250 kW complessivi (200 per la sola TBM e 50 per tutti gli altri fattori in elenco).

Per mantenere all'incirca costante a 26 °C la temperatura in tutta la galleria evitando di concentrare in una singola zona la sorgente di raffreddamento durante la fase di scavo, si è ipotizzato in galleria il ricorso ad un sistema di raffreddamento flessibile ripartito.

Delle unità frigorifere munite di radiatori saranno disposte in prossimità dei fronti di lavoro e delle principali sorgenti di calore, raffreddando l'aria del tunnel direttamente nella zona interessata dalle lavorazioni.

Con questo tipo di sistema, il calore prodotto viene smaltito a mezzo scambio termico con un circuito d'acqua fredda proveniente da una torre di raffreddamento posta all'esterno della galleria.

Tenendo conto tutti i fattori di dimensionamento in sicurezza⁽⁶⁾, in questo primo approccio progettuale si è ipotizzato che gli apparati di raffreddamento abbiano le seguenti caratteristiche tecniche:

• Potenza unitaria dell'intero sistema:	300 kW
• Assorbimento elettrico:	75 kW
• Fattore di rendimento termico:	4
• Temperatura di ingresso dell'acqua (condensatore):	25 °C
• Temperatura di uscita dell'acqua (evaporatore):	35 °C
• Portata di acqua di raffreddamento:	9 l/s
• Dimensionamento globale ventilatore/evaporatore ca.:	7x1x1 m
• Dimensionamento globale unità frigorifera ca.:	3,5x1x1 m

⁽⁶⁾ Valore nominale (250 kW) + un fattore di incremento pari al 20%.

cavation phase, recourse to a *distributed flexible cooling* system in the tunnel was presupposed.

Refrigerating units with radiators will be positioned close to the work fronts and the main heat sources, cooling the tunnel air in the area involved by works directly.

With this type of system, the heat produced is eliminated through heat transfer with a cold water circuit coming from a cooling tower placed outside the tunnel.

During this first design approach and taking into account all the sizing factors in safety⁽⁵⁾, it was presupposed that the cooling equipment has the following technical features:

• Unit power of the whole system:	300 kW
• Power draw:	75 kW
• Thermal yield factor:	4
• Incoming water temperature (condenser):	25 °C
• Water output temperature (evaporator):	35 °C
• Cooling water flow:	9 l/s
• Ventilator/evaporator global sizing approx.:	7x1x1 m
• Refrigerating unit global sizing approx.:	3.5x1x1 m

As previously mentioned, the relatively limited sizes of these refrigerating units allow installation near any excavation front directly.

Fig. 5 gives an idea of the presupposed cooling concept during the excavation phase.

On closer inspection, such sizing appears to be through and through indicative and rough.

LTF has actually deliberately gone into depth on this so as to leave it free to interpretation and design to companies that will realise the executive project and, consequently, the excavation works.

5. Temperature conservation during the operation phase (32 °C, dry bulb)

In addition to the rock temperature that produces a natural heat transfer with the tunnel walls, the heat sources to be dissipated during the operation phase are due:

- to the transit of trains (that above all generate heat transfer through convection) for approximately 80% of the overall heat;
- to water evaporation for approximately 7% of the overall heat;

⁽⁶⁾ Nominal value (250 kW) + an increase factor equal to 20%.

OSSERVATORIO

Come accennato in precedenza, le dimensioni relativamente limitate di queste unità frigorifere ne permettono l'installazione direttamente in prossimità di qualunque fronte di scavo.

La fig. 5 dà un'idea del concetto di raffreddamento ipotizzato in fase di scavo.

A ben vedere tale dimensionamento risulta del tutto indicativo e di massima.

Esso difatti non è stato volutamente approfondito da LTF al fine di lasciare libero spazio interpretativo e progettuale alle aziende che realizzeranno il progetto esecutivo e, di conseguenza, i lavori di scavo.

5. Mantenimento della temperatura in fase di esercizio (32 °C, bulbo secco)

In aggiunta alla temperatura della roccia che produce in sé uno scambio termico naturale con le pareti del tunnel, le sorgenti di calore da dissipare in fase di esercizio sono dovute:

- al passaggio dei treni (che generano soprattutto uno scambio termico per convezione) per circa l'80% del calore totale;
- all'evaporazione dell'acqua per circa il 7 % del calore totale;
- al flusso di aria calda indotto in estate dal passaggio dei treni nel tunnel (pistonamento), in corrispondenza dei pozzi e delle discenderie (collegate aeraulicamente con l'esterno) per un massimo in estate di circa il 5% del calore totale;
- alle sorgenti di calore ausiliarie riconducibili agli

- to the induced hot air flow in summer by the transit of trains in the tunnel (piston effect) in correspondence of the wells and shafts (aeraulically connected to the outside) for a maximum of 5% of the overall heat in the summer;

- to the auxiliary heat sources ascribable to the railway and non-railway systems (catenary, transformers, lighting etc.) for approximately 7% of the overall heat;

The long-term combination calculation of these four factors has highlighted that heating produced by the operation of the tunnel (where train transit is by far the predominant item) would not have balanced with the natural heat disposal capability of the tunnel (natural cooling of the tunnel towards the rock, air change through train piston effect, etc.).

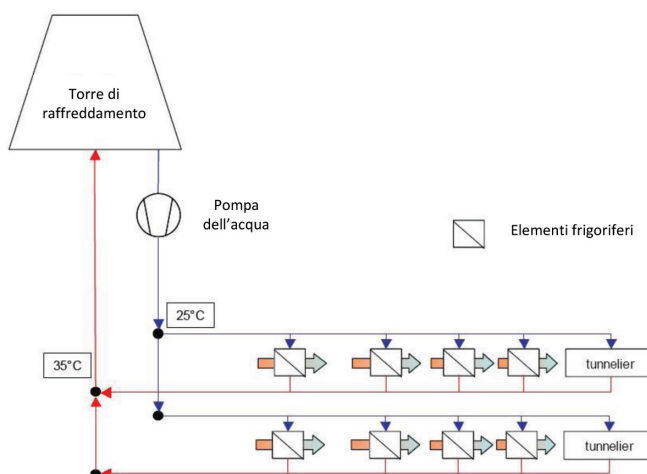


Fig. 5 - Concetto di raffreddamento ipotizzato in fase di scavo. *Presupposed cooling concept during the excavation phase.*

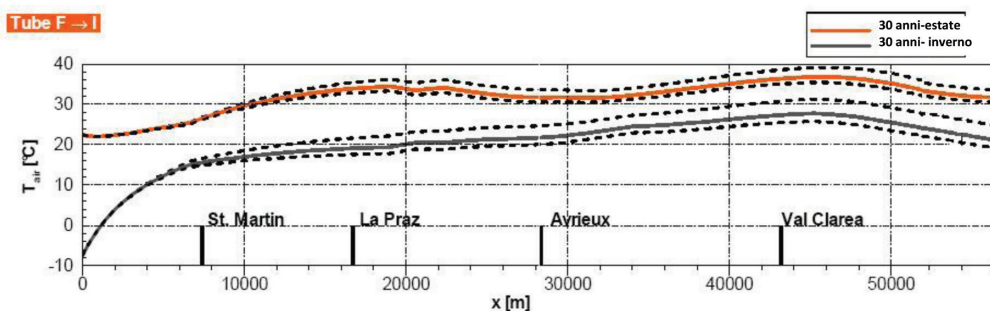


Fig. 6 - Temperatura di riferimento nel tunnel e delta di tolleranza dopo 30 anni di esercizio. *Reference tunnel temperature and delta tolerance after 30 years of operation.*

OSSERVATORIO

impianti ferroviari e non ferroviari (catenaria, trasformatori, illuminazione ecc) per circa il 7% del calore totale.

Il calcolo della combinazione a lungo termine di questi quattro fattori ha evidenziato che il riscaldamento prodotto dall'esercizio del tunnel (in cui il passaggio dei treni è di gran lunga la voce preponderante) non sarebbe stato in equilibrio con la naturale capacità di smaltimento termico propria del tunnel (raffreddamento naturale del tunnel verso la roccia, rinnovo dell'aria attraverso il pistonamento dei treni, ecc).

Per definire compiutamente i dati di input dello studio, quanto sopra esposto deve essere relazionato alla potenza messa in gioco nello svolgimento delle varie attività umane da svolgersi all'interno del tunnel, ovvero all'ascissa di fig. 4.

In order to fully define the input information of the study, the above must be related to the power put at stake in the performance of the different human activities to be carried out within the tunnel, that is with the x-axis in fig. 4.

In our case, it was assessed that the ordinary maintenance activities should be planned on 4-hour daily shifts, under a controlled ventilation regime and without involving prolonged heavy works.

It is estimated that the average power generated (energy metabolism) for this type of activity on a healthy man never exceeds $180\div190 \text{ W/m}^2$ that is, $320\div350 \text{ W}$ in terms of Watt for a man with an average body area of $1,8 \text{ m}^2$.

Therefore, based on the analysis of the existing rules concerning maintenance operations in the tunnel in one with a series of technical and economic evaluations, a ref-

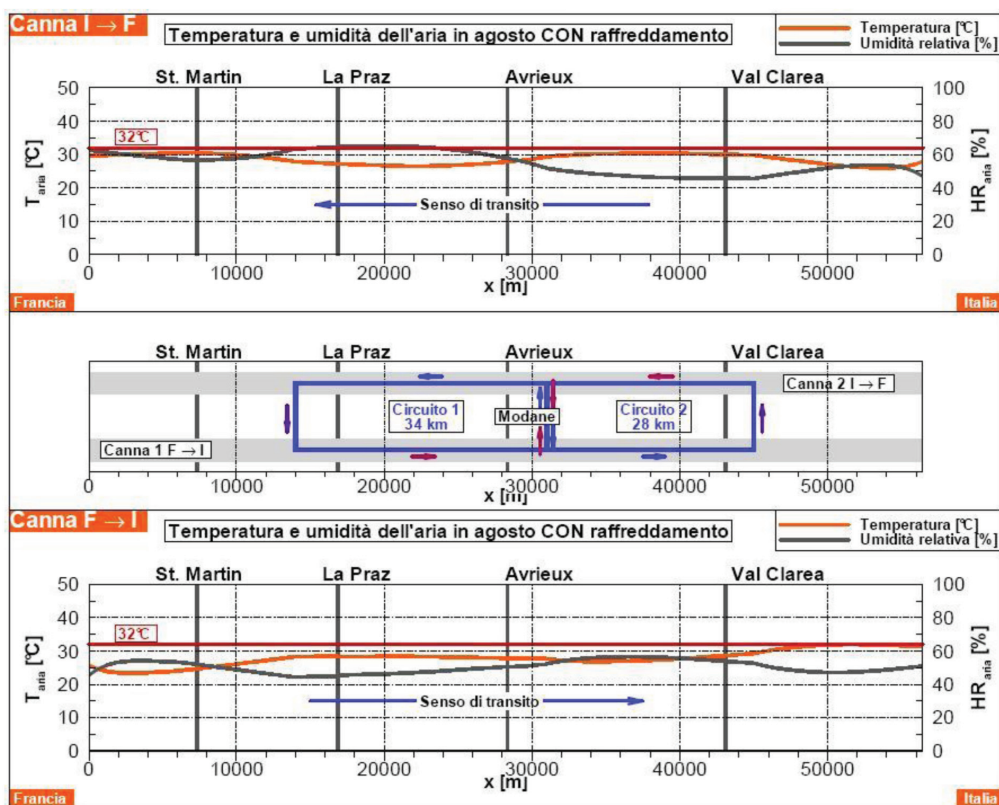


Fig. 7 - Profilo di temperatura e dell'umidità dell'aria nel mese di agosto (il mese più caldo e umido) nelle due canne con sistema di raffreddamento attivato. Al centro: schema della disposizione del circuito di raffreddamento all'interno del tunnel. Temperature and air humidity profile during the month of August (the most hot and humid month) in the two tubes with cooling system enabled. At the centre: diagram of the arrangement of the cooling circuit inside the tunnel.

OSSERVATORIO

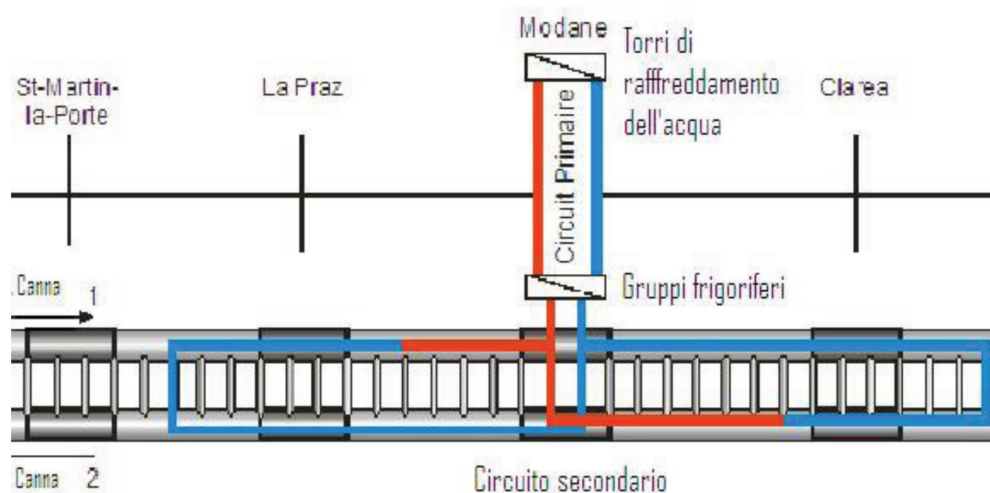


Fig. 8 - Schema del circuito primario e del circuito secondario nel tunnel di base. Primary circuit and secondary circuit diagram of the basic tunnel. (Tube; Secondary circuit; Primary circuit; Refrigerator groups; Water cooling towers).

Nel nostro caso si è valutato che le attività di manutenzione ordinaria siano previste su turni di lavoro di 4 ore per giorno, sotto un regime di ventilazione controllata e senza implicare dei lavori pesanti prolungati.

Si stima che la potenza media generata (metabolismo energetico) per questo tipo di attività su un uomo sano non superi mai i $180 \div 190 \text{ W/m}^2$ ovvero, esprimendo la grandezza in Watt, i $320 \div 350 \text{ W}$ per un uomo con superficie corporea media di $1,8 \text{ m}^2$.

Pertanto, basandosi sull'analisi delle norme esistenti relative alle operazioni di manutenzione in tunnel in uno con una serie di valutazioni tecnico/economiche, è stata proposta una temperatura di riferimento di 32°C , temperatura che, in condizioni naturali, verrebbe ad essere superata nel tunnel solamente in estate (fig. 6).

Tutti i fattori di dimensionamento elencati in precedenza hanno costituito la base per complessi calcoli termodinamici sviluppati a mezzo di particolari software dedicati (es. TNT "Tunnel Nets & Trains" per il solo scambio termico dovuto al pistonamento dei treni).

Senza entrare nel merito delle complesse equazioni applicate per ciascun fattore di scambio termico, i risultati hanno condotto ad ipotizzare un sistema di raffreddamento capace di fornire una massima potenza frigorifera di circa 15 MW da predisporre nel settore centrale del tunnel e da attivare durante i soli mesi estivi (da giugno a settembre).

Ovviamente l'obiettivo è quello di ottenere a pieno regime un'evoluzione di temperatura che non superi mai i 32°C in ciascuna canna (fig. 7).

reference temperature of 32°C was proposed, a temperature that would only be exceeded in summer (fig. 6), in natural conditions.

All sizing factors previously listed have set the basis for complex thermodynamic calculations developed through particular dedicated software (e.g. TNT "Tunnel Nets & Trains" just for the heat transfer due to the piston effect of trains).

Without entering into the merit of the complex equations applied for each heat transfer factor, the results have led to presuppose a cooling system capable of supplying the maximum refrigerating power of approximately 15 MW to be arranged in the middle section of the tunnel and to be activated during the summer months only (from June to September).

The aim is obviously to achieve a temperature development at full regime that never exceeds 32°C in each tube (fig. 7).

Following the evaluation of different technically feasible cooling solutions (nebulisation, cooling through ventilation, water cooling), the design of a water cooling system was chosen with a cooling station installed outside in correspondence of the Modane gangway, barycentric with respect to the tunnel section to be refrigerated.

The system principle consists of two separate circuits that operate on two different temperature levels:

- 1- a primary circuit that allows heat transfer with the atmosphere through three water cooling towers placed externally;

OSSERVATORIO

In seguito alla valutazione di svariate soluzioni di raffreddamento tecnicamente possibili (nebulizzazione, raffreddamento a mezzo ventilazione, raffreddamento ad acqua), si è optato per la progettazione di un sistema di raffreddamento ad acqua con una centrale di raffreddamento installata all'esterno in corrispondenza dell'ingresso della discenderia di Modane, baricentrica rispetto alla sezione di tunnel da refrigerare.

Il principio del sistema consiste in due circuiti distinti che lavorano a due livelli di temperatura differenti:

- 1- un circuito primario che permette lo scambio di calore con l'atmosfera tramite tre torri di raffreddamento dell'acqua situate all'esterno;
- 2- un circuito secondario che corre all'interno del tunnel finalizzato all'estrazione del calore nel tunnel e funzionante di fatto come un gigantesco scambiatore di calore.

La fig. 8 mostra schematicamente i due circuiti (primario e secondario).

Il circuito secondario è costituito da un tubo di mandata e da un tubo di ritorno in ciascuna canna ciascuno di 350 mm di diametro, collegati idraulicamente a tre gruppi frigoriferi e formanti due anelli che si diramano dal piede della discenderia di Modane rispettivamente verso la Francia (ovest) per 17 km e verso l'Italia (est) per 14 km (fig. 9).

L'acqua refrigerata esce dai gruppi frigoriferi inizialmente a 3°C e viene messa in circolo a una velocità di circa 1,5 m/s tramite pompe di diverso tipo (a portata variabile e costante).

La temperatura di ritorno dell'acqua è prevista essere di circa 15°C nel mese di agosto.

Tale soluzione è di fatto la stessa soluzione adottata per l'impianto di raffreddamento messo in opera da Euro-tunnel nel tunnel sotto la Manica.

A solo titolo informativo, aggiungiamo che ad oggi tale impianto, storicamente già presente in alcune coltivazioni minerarie, come per esempio nella miniera di pirite di Campiano nelle colline metallifere toscane, rappresenta l'unica applicazione esistente di raffreddamento di tunnel ferroviari, è in grado di erogare una potenza frigorifera massima di 43 MW e comprende il più grande sistema al mondo di produzione di acqua refrigerata

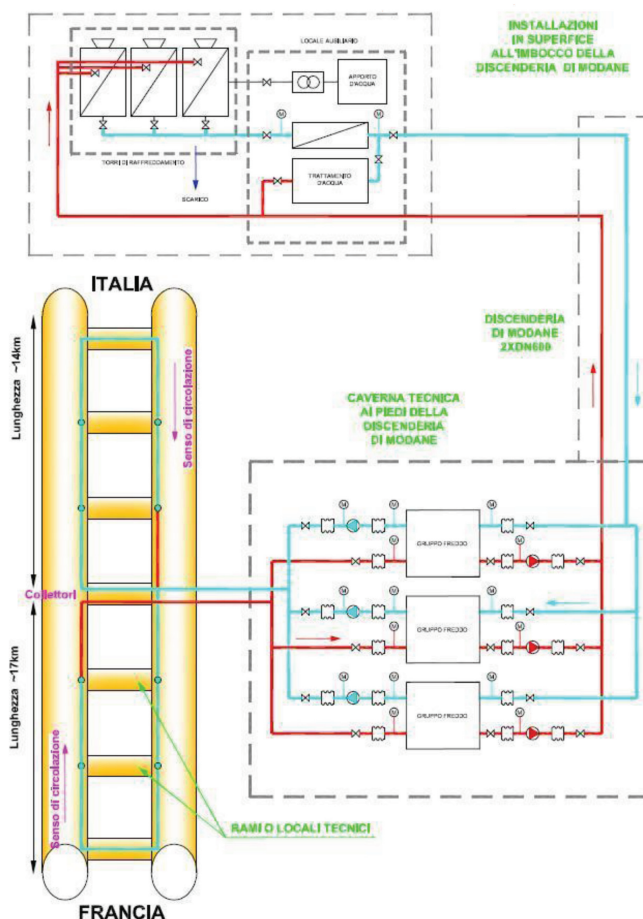


Fig. 9 - Schema idraulico dell'impianto di raffreddamento previsto. *Hydraulic diagram of the planned cooling system. (Running way; Length; Connection branches or technical rooms; Modane gangway; Refrigerating group; Technical recess at the bottom of the Modane gangway; Headers; Surface installations at the mouth of the Modane gangway; Auxiliary room; Water treatment; Cooling Towers; Discharge; Water supply).*

- 2- a secondary circuit that runs inside the tunnel aimed at extracting heat from the tunnel and actually operating as a gigantic heat exchanger.

Fig. 8 schematically shows the two circuits (primary and secondary).

The secondary circuit consists of a throw pipe and a return pipe in each tube of the tunnel, each measuring a diameter of 350 mm, hydraulically connected to three refrigerating groups and forming two rings that branch off from the foot of the Modane gangway towards France

OSSERVATORIO

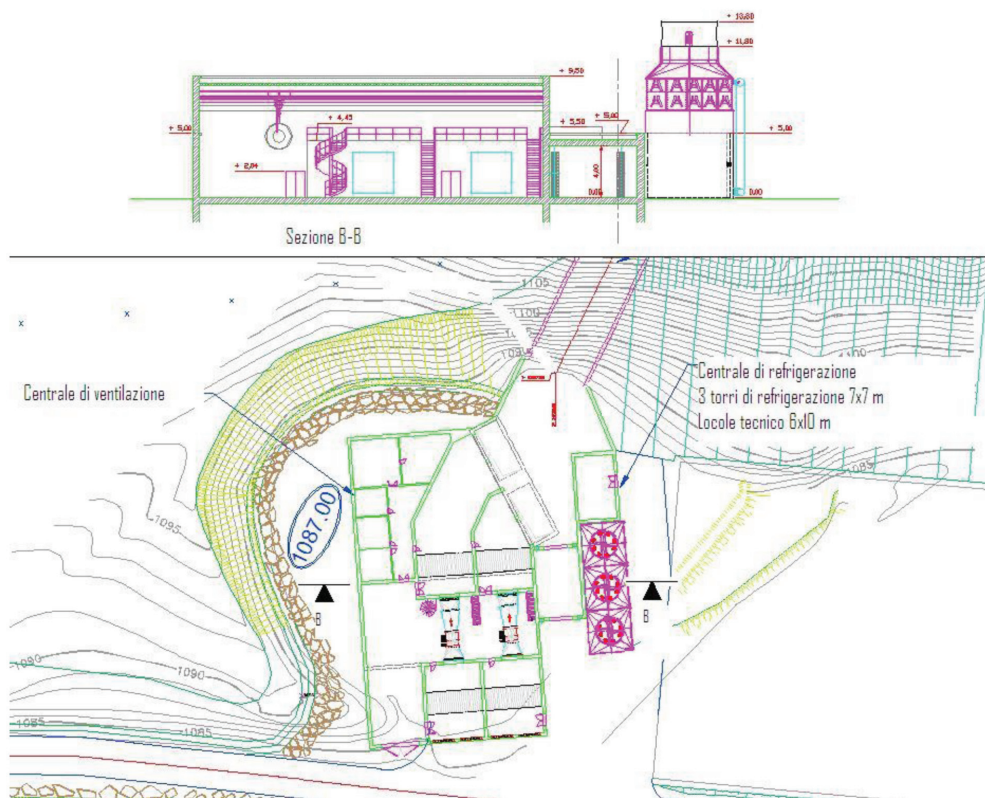


Fig. 10 - Lay-out della centrale di raffreddamento esterna prevista a Modane. *Lay-out of the external cooling station planned in Modane.* (Ventilation power plant; Refrigeration power plant; 3 refrigerating towers; Technical Room; Section).

(da 240 milioni di litri distribuiti attraverso oltre 230 km di tubazioni, comprese quelle presenti negli scambiatori esterni).

Gli studi condotti da LTF hanno portato ad un dimensionamento fisico delle installazioni sia esterne che interne al tunnel ed al conseguente posizionamento in sezione delle due condotte facenti funzioni di scambiatori.

Le figg. 10, 11 e 12 danno un'idea dello stato dell'arte della progettazione.

6. Conclusioni

L'importante quantità di dati geologici acquisiti nel tempo ha permesso ai geologi di proporre un modello geotermico relativamente affidabile (buona coerenza tra i dati osservati e i dati simulati) in particolare per la zona sotto il massiccio d'Ambin in cui sono attese tempe-

(westwards) for 17 km and towards Italy (eastwards) for 14 km (fig. 9) respectively.

The refrigerated water initially comes out of the refrigerating group at 3°C and goes into circulation at a speed of approximately 1.5 m/s through different types of pumps (with variable and constant capacity).

The return water temperature is forecasted to be approximately 15°C in the month of August.

Such solution is in fact the same solution adopted for the cooling system implemented by Eurotunnel in the tunnel under the Channel.

By way of illustration, we would like to add that to date, such system represents the only existing application of railway tunnel cooling, already historically present in some mineral cultivations such as for example in the Campiano pyrite mine on the metal bearing hills of Tuscany, it can supply a maximum refrigerating power of 43

OSSERVATORIO

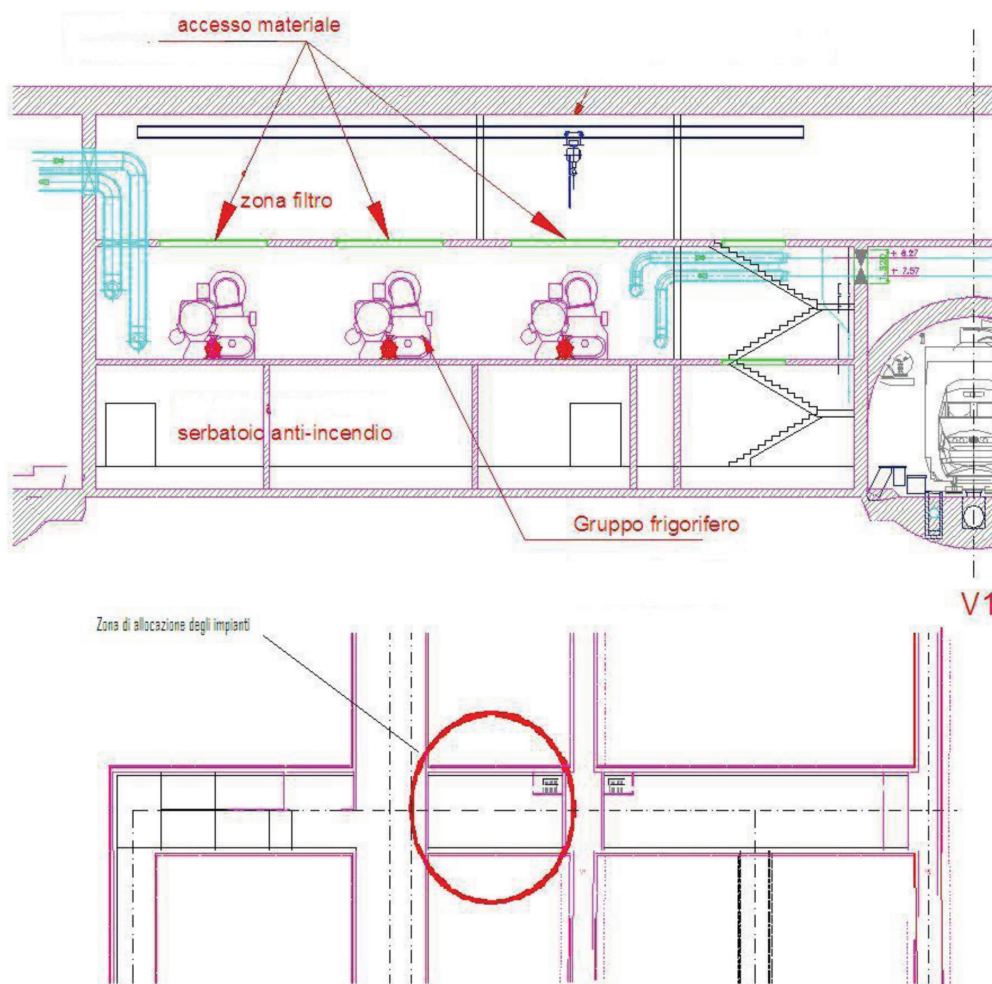


Fig. 11 - Sezione tipo in corrispondenza dei gruppi frigoriferi interni e identificazione della zona di allocazione degli impianti nel reticolo di gallerie previste a Modane. *Standard section in correspondence of the internal refrigeration groups and identification of the system allocation areas in the tunnel network planned in Modane. (Plants localization area; Refrigerator group; Materials access; Filter Area; Fire tank).*

rature abbondantemente superiori a 30°C su circa 13 km di tunnel.

Questi modelli geotermici, in aggiunta alle fonti di calore che normalmente si producono in fase di scavo o di esercizio ferroviario, mostrano la necessità di mettere in opera dei sistemi di raffreddamento temporanei per la fase di scavo e permanenti per l'esercizio.

Tutti gli studi di settore dimostrano che solo attraver-

MW and includes the largest refrigerated water production system in the world (from 240 million litres distributed throughout over 230 km of piping, including those existing in the external exchangers).

The studies run by LTF have led to a physical sizing of both the external and internal tunnel installations and consequently to the placement in section of the two ducts operating as exchangers.

OSSERVATORIO

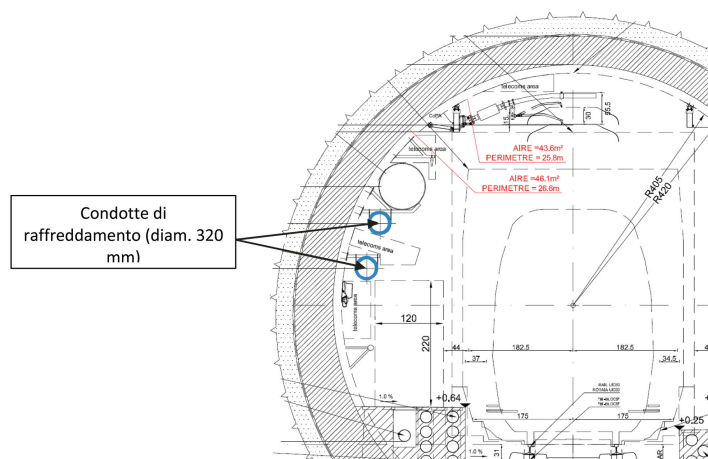


Fig. 12 - Disposizione delle due condotte di raffreddamento all'interno della sezione tipo del tunnel.

so questi impianti sono raggiungibili le condizioni di temperatura massima ammissibile dalle norme per lo svolgimento del lavoro umano in galleria, ovvero:

- 26°C in ambiente umido durante le fasi di scavo;
- 32°C in ambiente secco (introducendo nei calcoli un'approssimazione tollerabile) in fase di manutenzione dell'infrastruttura durante il normale esercizio ferroviario.

Per la fase di scavo la progettazione ha condotto ad un dimensionamento di massima di un sistema di raffreddamento flessibile ripartito lungo le gallerie man mano che si procede nello scavo.

Durante l'esercizio si è ipotizzato un impianto permanente a circuito chiuso ad acqua refrigerata da predisporre nella sezione mediana del tunnel e in grado di erogare una potenza massima frigorifera di circa 15 MW.

Il suo funzionamento è previsto nei soli mesi estivi in cui ci si attende il superamento della temperatura di soglia di 32°C seppure solo in alcuni settori del tunnel.

Figures 10, 11 and 12 give an idea of the state of art of the design.

6. Conclusions

The significant amount of geological information acquired over time has allowed geologists to propose a relatively reliable geothermal model (good consistency between observed data and simulated data) particularly for the area under the Ambin massif where temperatures are expected to be well over 30°C on approximately 13 km of the tunnel.

In addition to heat sources that are normally produced during the excavation phase or railway operation, these geothermal models show the need to implement temporary cooling systems

for the excavation phase and permanent ones for operation.

All sectorial studies show that the maximum acceptable temperature conditions, according to rules concerning the execution of human work in tunnels, can be achieved only through these systems, that is:

- 26°C in a wet environment during the excavation phases;
- 32°C in a dry environment (introducing a tolerable approximation in calculations) in the infrastructure maintenance phase during normal railway operation.

The design has led to a provisional sizing of a flexible cooling system for the excavation phase distributed along the tunnels as excavation is performed.

During operation, a permanent refrigerated water closed circuit system to be arranged in the mid-line section of the tunnel was presupposed, capable of supplying a maximum refrigerating power of approximately 15 MW.

Its operation is planned only for the summer months when the threshold temperature of 32°C is expected to be exceeded, even if only in some of the tunnel sections.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] Decreto PR 320 del 20 marzo 1956.
- [2] NORMA NF EN 27. 243 (ISO 7243).
- [3] MENARD, (2001), "Tunnel di base" - Studi preliminari Università di Grenoble, Rapporto geotecnico n 9, fascicolo 3, geotermia, rapporto interno.
- [4] Università la Sapienza RM, (2001), "Appunti per la progettazione del benessere".