



Rilevamento Temperature Sottocassa dei Treni (RTST) nella linea di metropolitana di Genova

Undercarriage Temperature Analysis System in Genoa underground line

Dott. Elisa MASSARA^(*)
Dott. Nadia MAZZINO^(*)
Ing. Stefano TERRIBILE^(*)
Ing. Leonetto BORDIGNON^(**)
Dott. Romina COSTA^(**)
Ing. Emanuela CERVETTO^(***)
Ing. Franco MONTEBRUNO^(***)

1. Premessa

L'ambiente metropolitano è caratterizzato da lunghe gallerie, ambienti confinati e pertanto critici per la gestione di incidenti ove l'intervento di mezzi di soccorso è particolarmente difficoltoso (fig. 1). Tra le diverse tipologie di incidenti che possono avvenire in ambito metropolitano il più temuto è l'incendio [1].

In questo scenario, infatti, la propagazione di un incendio comporterebbe danni di notevole entità sia a persone che agli impianti stessi. Pertanto occorre adottare opportune misure di prevenzione atte a gestire tempestivamente i potenziali eventi pericolosi.

2. Incendi nelle metropolitane

Lo sviluppo di incendi in galleria può derivare da cause diverse tra le quali [2]:

- guasti meccanici o elettrici alle vetture ovvero corto circuito, surriscaldamento o falsi contatti (cause molto frequenti);
- incidenti di carattere doloso o provocati dai passeggeri;
- guasti alle apparecchiature elettriche o elettromeccaniche installate all'interno della galleria (cause queste ultime in verità poco frequenti);
- rilascio di sostanze infiammabili, tossiche, pericolose trasportate o esterne;
- incendio di materiale combustibile in galleria.

1. Introduction

The underground environment is characterised by long tunnels, confined environments and therefore critical to the management of accidents where the intervention of emergency vehicles is particularly difficult (fig. 1). Among the different types of accidents that can happen in the underground sector the most feared is fire [1].

In this scenario, the propagation of a fire would in fact cause major damage to both people and to the systems themselves. We must therefore adopt appropriate preventive measures in order to manage the potential hazardous events in a timely manner.

2. Fires in underground lines

The development of fire in a tunnel can result from several causes, including:



Fig. 1 - Galleria della metropolitana di Genova.
Fig. 1 - Genoa underground gallery.

^(*) Ansaldo STS SpA.

^(**) EAT S.r.l.

^(***) AMT Genova.

In collaborazione con l'Università degli studi di Genova nei settori Ingegneria dei Trasporti e Ingegneria Informatica: Relatore: R. SACILE; Tesisti: A. SPEKTOR, M. IVALDI.

^(*) Ansaldo STS SpA.

^(**) EAT S.r.l.

^(***) AMT Genova.

In collaboration with the University of Genoa in the Transport Engineering and Computer Engineering fields: Presenter: R. SACILE; Doctoral candidates: A. SPEKTOR, M. IVALDI.

Negli ultimi anni, una serie di incendi classificati come catastrofici in gallerie metropolitane hanno apportato un forte effetto sugli standard di progettazione e di sicurezza, così come sulla percezione del problema da parte del pubblico.

Gli incendi, di grande proporzioni, comportano danni strutturali e perdite di vite umane; nelle gallerie, essendo luoghi confinati e con bassa visibilità, essi possono svilupparsi rapidamente (le temperature possono superare anche i 1000°C) e possono amplificarne le conseguenze.

La potenza termica emessa e la durata dell'incendio dipendono principalmente dalla:

- tipologia del materiale;
- struttura superficiale costituente la vettura;
- disponibilità locale di comburente.

Lo sviluppo delle fiamme dipende in modo sensibile dalla velocità longitudinale dell'aria, il tempo necessario per l'evoluzione di un incendio è generalmente molto limitato (dall'innesco all'istante in cui tutto il convoglio è in fiamme può trascorrere un tempo generalmente non superiore ai 7÷20 minuti).

Questi disastri hanno messo in discussione questo tipo di opere, per quanto riguarda i problemi connessi alla sicurezza e all'ambiente.

I lavori di riparazione e la conseguente chiusura delle gallerie hanno altresì comportato ulteriori conseguenze di ordine sia economico che ambientale.

Il tempo disponibile per l'evacuazione dei passeggeri e l'intervento delle squadre di soccorso, senza il rischio di crollo strutturale, in caso d'incendio è normalmente molto limitato.

Un'elevata produzione di fumi può provocare una rapida diminuzione della visibilità; inoltre si possono verificare problemi di comunicazione tra i soccorritori e la sala radio, e difficoltà a far pervenire le indicazioni agli utenti.

Tutti questi fattori possono dilatare i tempi d'intervento rendendo ancora più stringenti i vincoli temporali.

3. Fattori di rischio nelle metropolitane

Il rischio d'incendio deve essere valutato da un punto di vista qualitativo e quantitativo.

In merito a sicurezza antincendio e gestione dell'emergenza il livello di rischio di incendio del luogo di lavoro si classifica in 3 livelli [3]: *rischio elevato, rischio medio e rischio basso*.

Secondo tale classificazione le metropolitane vengono considerate come luoghi a rischio elevato in caso di incendio.

Secondo quanto riportato nella normativa [2], l'analisi di rischio incendio nelle gallerie metropolitane si suddivide nelle seguenti fasi operative:

- *mechanical or electrical breakdowns in wagons or short circuit, overheating or false contacts (very frequent causes);*
- *incidents of fraudulent nature or caused by passengers;*
- *failures of electrical or electromechanical equipment installed inside the gallery (not so often anymore);*
- *release of flammable, toxic, hazardous transported or outdoor;*
- *burning of combustible material in the gallery.*

In recent years, a series of fires classified as catastrophic in tunnels underground, have made a strong impact on the standards of design and safety, as well as on the perception of the problem by the public.

Fires of great proportions involve structural damage and loss of lives; in galleries, being these confined places and with low visibility, they may develop rapidly (temperatures can exceed even 1000° C) and can amplify the consequences.

The thermal power output and the duration of the fire mainly depend on:

- *kind of material;*
- *surface structure forming the wagon;*
- *local availability of inflammable material.*

The development of flames depends sensitively on the longitudinal air speed, the time for the evolution of a fire is generally very limited (from initiation to the moment when the whole convoy is on fire there may be a time lapse generally not exceeding 7 ÷ 20 minutes).

These disasters have questioned this kind of works, with regards to problems related to safety and the environment.

The repair work and the subsequent closure of the galleries have also entailed additional consequences of economic and environmental order.

The time available for the evacuation of passengers and the operation of the rescue teams, without the risk of structural collapse in the event of fire is usually very limited.

High production of smoke can cause rapid reduction in visibility. There may also be communication problems between the rescuers and the control room, and difficulties in sending instructions to users.

All these factors may increase intervention times making time constraints even more stringent.

3. Risk factors in underground lines

The risk of fire must be assessed from the quality and quantity point of view.

About fire safety and emergency management, the level

- identificazione dei pericoli;
- classificazione e selezione degli eventi pericolosi;
- stima della probabilità di accadimento degli eventi pericolosi;
- analisi degli scenari incidentali;
- stima della probabilità degli eventi caratteristici degli scenari incidentali;
- analisi delle conseguenze;
- valutazione dei profili di rischio;
- misure per la mitigazione del rischio.

La procedura di analisi di rischio si basa sull'applicazione critica di metodi probabilistici consolidati per la valutazione del rischio di eventi complessi: tipicamente utilizzati sono il metodo ad "Albero delle Cause" (Fault Tree Analysis-FTA) e quello ad "Albero degli Eventi" (Event Tree Analysis-ETA), spesso combinati a studi di scenario per la valutazione delle conseguenze associate a ciascun evento incidentale. L'analisi di rischio incendio nelle gallerie metropolitane ha lo scopo iniziale di valutare la probabilità di accadimento dell'evento incidentale e la gravità delle conseguenze connesse all'evoluzione di tale evento. Per fornire tale stima è necessario considerare l'accettabilità del rischio: a causa dell'aleatorietà della misura del danno, si prende in considerazione soltanto la sola componente della salvabilità dei passeggeri.

All'interno delle metropolitane si possono riscontrare diversi fattori che determinano il livello di pericolo e di vulnerabilità del sistema di trasporto in caso d'incidente, che riguardano i seguenti aspetti peculiari:

- *sistema ferroviario*: costituito dai treni, dall'armamento, dall'elettrificazione e dai sistemi di segnalamento;
- *locali e ambienti a rischio specifico*: hanno l'obiettivo di assicurare la funzionalità del sistema di trasporto e degli impianti tecnologici di servizio presenti nei vari ambienti dell'infrastruttura: tunnel e stazioni;
- *affollamento delle stazioni metropolitane e dei treni*: bisogna prendere in considerazione oltre alla densità specifica di affollamento, anche l'eterogeneità delle persone ed il fenomeno del panico che porta la folla ad assumere comportamenti irrazionali;
- *condizioni fisiche, geometriche ed impiantistiche degli ambienti ove potrebbe verificarsi l'incidente*: queste ultime sono determinanti, sia per l'evoluzione dello scenario incidentale (propagazione dei fumi, diminuzione della visibilità, ecc) che per l'influenza sui comportamenti delle persone che debbono allontanarsi dalla metropolitana per raggiungere lo spazio scoperto, in luogo sicuro (profondità delle banchine, linearità dei percorsi, ripidezza delle scale, ecc.);
- *sistemi e strategie di contenimento degli effetti dell'incidente, che vengono adottati mediante misure di protezione che a loro volta possono essere attive o passive*: l'efficienza di tali accorgimenti, determina in modo

of fire risk in the workplace is classified into 3 levels [3]: high risk, medium risk and low risk.

According to this classification undergrounds are considered high-risk places in case of fire.

As reported in legislation [2], the analysis of fire risk in underground tunnels is divided into the following operational steps:

- *identification of hazards;*
- *classification and selection of dangerous events;*
- *estimates of the probability of occurrence of dangerous events;*
- *analysis of incidental scenarios;*
- *estimate of the probability of characteristic events of incidental scenarios;*
- *analysis of the consequences;*
- *assessment of risk profiles;*
- *measures for the mitigation of risk.*

The risk analysis procedure is based on the critical application of consolidated probabilistic methods for the risk assessment of complex events: those typically used are the "Cause Tree" method (Fault Tree Analysis-FTA) and the "Event Tree" (Event Tree Analysis-ETA), often combined with scenario studies for the evaluation of consequences associated with each accidental event. The analysis of fire risk in underground galleries is intended to assess the initial probability of occurrence of the incidental event and the severity of the consequences related to the evolution of this event. To provide such estimate we need to consider the acceptability of risk: due to the randomness of the extent of the damage, we take into consideration the only component of the passenger's safety

Inside the underground, several factors can be found that determine the level of danger and vulnerability of the transportation system in the event of an accident, involving the following distinctive features:

- *railway system: consisting of trains, permanent way, electrification and signalling systems;*
- *location and environment at specific risk: these have the purpose of ensuring the functionality of the transport system and service technological systems present in the various infrastructure environments: tunnels and stations;*
- *crowding of underground stations and trains: we also have to take into account the diversity of people and the panic phenomenon that leads the crowd to irrational behaviours in addition to the specific density of crowding;*
- *physical, plant engineering and geometrical environments conditions where the accident may occur: the latter are crucial, both for the evolution of the accident scenario (smoke propagation, decreased visibility, etc.)*

essenziale le effettive conseguenze di danno dell'evento, a seconda della capacità di limitare immediatamente gli effetti all'area strettamente interessata dall'incidente (mediante sistemi di spegnimento, estrazione dei fumi, capacità di reazione al fuoco dei materiali, segnaletica ed illuminazione di sicurezza);

- *elementi esterni al sistema di trasporto che possono determinare eventi gravi ed imprevedibili per cause non associate al funzionamento ed alle strutture del sistema di trasporto:* tali elementi possono essere associati a fenomeni naturali, ovvero essere generati da cause antropiche.

Nell'ultima categoria vanno distinti gli eventi che, pur generandosi all'esterno della metropolitana, determinano effetti negativi sul funzionamento del sistema di trasporto, ed anche quelli generati all'interno della metropolitana da atti di persone sconsiderate o di terroristi.

È quindi stato necessario regolamentare a norma di legge delle procedure per poter individuare le misure di prevenzione e di protezione da attuare in caso di incendio.

4. Quadro normativo di riferimento

Tra i principali provvedimenti approvati dal Parlamento Italiano nell'ambito della sicurezza antincendio delle stazioni e delle linee nel settore metropolitano/ferroviario vanno ricordati:

- Decreto Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 11/01/1988 in tema di prevenzione degli incendi nelle metropolitane;
- UNI CEI 11170 Parte 1, 2, 3 in tema di protezione al fuoco dei veicoli ferrotranviari ed a via guidata;
- Decreto Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 28/10/2005 in tema di sicurezza nelle gallerie ferroviarie.

La sicurezza nelle gallerie metropolitane viene disciplinata in Italia dalla normativa [3]. Il D.M. 11/01/1988 chiamato "Norme di prevenzione degli incendi nelle metropolitane" fissa i criteri generali progettuali da seguire nella costruzione delle metropolitane sia dal punto di vista delle opere civili che degli impianti.

Esso definisce "le misure di prevenzione e protezione dagli incendi da porre in atto nella realizzazione delle linee metropolitane di nuova costruzione, i cui progetti esecutivi non siano stati approvati alla data di entrata in vigore del presente decreto. Le presenti norme non comprendono quanto deve essere disposto in merito al comportamento del personale (movimento e manutenzione) e degli utenti".

Tale Decreto Ministeriale sviluppa i seguenti argomenti:

- elementi costitutivi di una metropolitana: le stazioni e le gallerie;

and affecting the behaviour of people that must move away from the underground to reach an open space in a safe place (platform depth, path linearity, steepness of stairs, etc.);

- systems and strategies for containment of the effects of the accident that are adopted through protective measures that in turn can be active or passive: *the efficiency of these precautions, fundamentally determines the actual consequences of the event, depending on the ability to immediately restrict the effects to the area strictly affected by the accident (through shutting down systems, smoke extraction, ability to reaction to fire of materials, signage and emergency lighting);*
- transportation system external elements which may result in serious and unpredictable events for reasons not related to operation and to structures of the transport system: *these items can be associated with natural phenomena, or be generated by anthropogenic causes.*

In the last category, events that, while being generated outside the underground determine negative effects on the operation of the transport system, must be distinguished, as well as those generated within the underground from acts of terror or vandalism.

It was therefore necessary to regulate the procedures by law in order to determine the prevention and protection measures to be implemented in the event of fire.

4. Reference regulatory framework

Among the main measures approved by the Italian Parliament in the framework of fire safety of stations and underground/railway lines the following are included:

- Decree of the Ministry of Infrastructures and Transport of 11/01/1988 on fire prevention in underground environments;
- UNI CEI 11170 Part 1, 2, 3 on fire protection of railway and track guided vehicles;
- Decree of the Ministry of Infrastructures and Transport of 28/10/2005 concerning safety in railway tunnels.

The law in Italy disciplines safety in underground tunnels [3]. Ministerial Decree 11/01/1988 called "Fire prevention regulations in underground environment" lays down the general criteria to be followed in design construction of undergrounds both from the point of view of civil works and systems.

It defines "fire prevention and protection measures to put in place in the implementation of newly built underground lines, whose executive projects were not approved at the date of entry in force of this decree. These standards do not include what must be provided concerning the behaviour of personnel (moving and maintenance) and users".

- le misure relative alle vie di uscita in caso di incendio: tra quali percorsi di sfollamento, percorsi protetti e aree protette;
- criteri di progettazione e le norme tecniche per la costruzione delle stazioni: tali criteri sono applicati alle strutture portanti, agli elementi ed ai componenti strutturali impiegati in tutti gli ambienti sotterranei;
- criteri progettuali per la realizzazione di gallerie: che riguardano percorsi di emergenza e materiali strutturali resistenti al fuoco;
- impianti tecnici di stazione e di gallerie.

In seguito sono elencati gli impianti principali da prevedersi per assicurare ai passeggeri e al personale tecnico le condizioni per evacuare il sito in sicurezza:

- impianti di ventilazione naturale e ventilazione forzata nelle gallerie;
- impianti antincendio del tipo sprinkler ed estintori manuali portatili;
- impianti di illuminazione di sicurezza e di allarme;
- impianti di diffusione sonora;
- impianti di controllo;
- impianti di rivelazione e segnalazione incendi.

Le opere civili, strutture ed elementi strutturali che delimitano le varie zone di una stazione, sia aperta al pubblico che adibita a locali tecnici, devono avere una resistenza al fuoco di tipo *REI 120/90/60* nonché una opportuna classe di resistenza al fuoco non superiore a 1.

In particolare, la sigla *REI* è un acronimo che sta per:

- *R* resistenza alla deformazione;
- *E* resistenza alla tenuta;
- *I* isolamento termico.

Tutte queste caratteristiche in caso d'incendio devono essere garantite dal manufatto per almeno 120, 90 o 60 minuti. Per quanto riguarda i materiali vengono assegnate le classi di resistenza al fuoco da 0 a 5 con l'aumentare della loro partecipazione alla combustione [4].

I materiali della classe di reazione al fuoco 0 sono non combustibili. I materiali delle classi da 1 a 5 sono combustibili, essendo la classe 1 la migliore e la classe 5 la peggiore.

Un altro prezioso contributo per la gestione e il monitoraggio della sicurezza antincendio è specificato nello standard *UNI CEI 11170 2005* che ha l'obiettivo di definire i metodi di prova per la valutazione del comportamento al fuoco dei materiali su scala di laboratorio, di stabilire i criteri di giudizio ed i limiti di accettabilità per i materiali.

In tal senso sono state elaborate tre norme che sotto il titolo generale "Veicoli ferroviari - Linee guida per la protezione al fuoco dei veicoli ferroviari ed a via guidata" costituiscono le tre parti dello standard:

This Ministerial Decree has the following topics:

- *constitutive elements of an underground: stations and tunnels;*
- *measures relating to the exit routes in case of fire: among which evacuation path, protected routes and protected areas;*
- *design criteria and technical standards for the construction of stations: these criteria are applied to bearing structures, elements and structural components used in all underground environments;*
- *design criteria for the construction of tunnels: concerning emergency routes and fire-resistant structural materials;*
- *technical equipment of station and tunnels.*

Below are some of the main systems to be provided to ensure passengers and technical staff the conditions to evacuate the station safely:

- *natural ventilation systems and forced ventilation in tunnels;*
- *sprinkler type fire-fighting systems and portable manual fire extinguishers;*
- *safety and alarm lighting systems;*
- *sound transmission systems;*
- *control systems;*
- *fire detection and signalling systems.*

Civil works, structures and structural elements that define the various areas of a station, both open to the public and used as technical rooms, must have a REI 120/90/60 type fire resistance and a suitable fire resistance class not exceeding 1.

In particular, REI is an acronym that stands for:

- *R deformation resistance;*
- *E seal resistance;*
- *I thermal insulation.*

The artefact in case of fire must guarantee all of these features for at least 120, 90 or 60 minutes. Regarding the materials, classes of fire resistance from 0 to 5 are assigned with the increase of their participation to combustion [4].

Materials of fire reaction class 0 are non-combustible. Materials of classes from 1 to 5 are combustible, being class 1 the best and class 5 the worst.

Standard UNI CEI 11170 2005 is another valuable contribution tool for the management and monitoring of fire safety which has the objective of defining the test methods for the evaluation of fire behaviour of materials on laboratories, of establishing the criteria of judgement and the acceptability limits for the materials.

To that effect three rules were developed under the general title "Rail Vehicles - Guidelines for fire protection of rail-

- *UNI CEI 11170-1*: Principi generali;
- *UNI CEI 11170-2*: Accorgimenti progettuali – Misure di contenimento dell'incendio – Sistemi di segnalazione, controllo di evacuazione;
- *UNI CEI 11170-3*: Valutazione del comportamento al fuoco dei materiali – Limiti di accettabilità.

Le misure ed i metodi di prova indicati nello standard citato devono essere applicati per tutti i materiali/componenti strutturali e non strutturali utilizzati per la costruzione di nuovi veicoli e per la ristrutturazione di quelli già in esercizio, nonché per quelli utilizzati per il normale ricambio di componenti.

La *Parte 1* [5] definisce le misure da adottare a bordo dei veicoli per il trasporto ferroviario ed a via guidata, per limitare il rischio d'incendio a bordo e per proteggere efficacemente i passeggeri ed il personale di servizio e riguardano:

- il comportamento al fuoco dei materiali e dei componenti di parte allestimento e di parte elettrica;
- la resistenza al fuoco delle "barriere antincendio" e degli "elementi taglia fuoco";
- gli accorgimenti progettuali e di design;
- la protezione per gli impianti elettrici ed elettronici;
- l'estinzione, controllo ed informazione (per esempio, freno di emergenza, sistemi di estinzione, sistemi di rilevamento, sistema di ventilazione, ecc.).

La *Parte 2* [6] fornisce i requisiti minimi che devono essere soddisfatti, in funzione del livello di rischio del veicolo in conformità alla parte, per:

- minimizzare il rischio che un incendio si sviluppi in un veicolo;
- contenerlo, nel caso si sviluppi, per il tempo necessario a permettere l'evacuazione dei passeggeri e del personale di bordo;
- fornire gli ausili necessari all'estinzione dell'incendio e/o ad una rapida e sicura evacuazione dal veicolo.

La *Parte 3* [7] definisce i metodi di prova per la valutazione in laboratorio del comportamento al fuoco dei materiali e ne stabilisce i criteri di giudizio, riferiti alle specifiche condizioni d'uso ed alla tipologia del veicolo.

La normativa è stata progressivamente sostituita dalla serie di Standard UNI CEI EN 45545 del 2013 (dal n°1 al n°7).

5. Introduzione al sistema RTST

Nello scenario di criticità presentato è stato realizzato il Sistema Rilevamento Temperature Sottocassa dei Treni (RTST), progettato e sviluppato nel 2009 da Ansaldo STS e da European Advanced Technologies s.r.l. (EAT) per poter rilevare in modo preventivo, tramite tecniche non invasive, fenomeni pericolosi nelle componenti critiche di un rotabile metropolitano.

way and track guided vehicles" constituting the three parts of the standard:

- *UNI CEI 11170-1: General principles;*
- *UNI CEI 11170-2: Design Solutions – Fire containment measures – Signalling systems, evacuation control;*
- *UNI CEI 11170-3: evaluation of reaction to fire of the materials – Acceptability limits.*

The measures and the test methods specified in this standard should be applied to all materials/structural and non-structural components used in the construction of new vehicles and for the restructuring of those already in operation, as well as those used for the normal replacement of components.

Part 1 [5] defines the measures to be taken on board vehicles for rail and track guided transport and to reduce the risk of fire aboard and to effectively protect passengers and service personnel and include:

- *reaction to fire of materials and components for the outfitting and electrical equipment;*
- *fire resistance of "fire fighting barriers" and "fire break elements";*
- *design and design measures;*
- *protection for electrical and electronic systems;*
- *extinguishment, control and information (for example, emergency brake, extinguishing systems, tracking systems, ventilation system, etc.).*

Part 2 [6] provides minimum requirements that must be met, depending on the level of risk of the vehicle in accordance with the part, to:

- *minimise the risk that a fire develops in a vehicle;*
- *contain it, if it develops, for the time necessary to allow the evacuation of passengers and on-board staff;*
- *provide necessary aids to the extinguishment of fire and/or for quick and safe evacuation from the vehicle.*

Part 3 [7] defines test methods for laboratory assessment of reaction to fire of the materials and establishes the criteria for judgement, with reference to the specific conditions of use and type of vehicle.

The legislation has been progressively replaced by the Standard series UNI CEI EN 45545 of 2013 (from n° 1 to n° 7).

5. Introduction to the RTST system

Due to all the criticalities listed above, an Undercarriage Temperature Analysis System was implemented, designed and developed in 2009 by Ansaldo STS and European Advanced Technologies s.r.l. (EAT) in order to proactively measure hazardous phenomena in critical components of

L'idea progettuale nasce a seguito dell'invito del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ad integrare gli usuali sistemi ed impianti di sicurezza con i nuovi che utilizzano moderne e innovative tecniche di mitigazione del rischio. Cercando di determinare a priori i possibili elementi scatenanti l'incendio, si possono adottare le opportune misure di intervento prima che questo abbia luogo. In ambito europeo, le ferrovie dei vari Paesi membri sono sempre più interessate alle tecnologie di ispezione automatiche che superano le problematiche delle attuali tecniche manuali [8].

In questo contesto si vuole inserire un sistema di controllo termico che dovrà rivelare in maniera automatica una serie di possibili situazioni termiche anomale dei convogli in transito.

L'obiettivo primario è quello di migliorare il livello di sicurezza della circolazione metropolitana, aumentando la protezione contro guasti o malfunzionamenti del rotabile, che sono la causa più frequente di incendio (come dettagliato nei paragrafi 2 e 3). I sistemi di monitoraggio più avanzati garantiscono la funzione di rilevamento guasti e protezione degli asset ferroviari attraverso sofisticati metodi di filtraggio dati, identificazione del sistema e di analisi dei segnali; a causa però della notevole complessità dei sistemi ferroviari, spesso tali tecnologie sono limitate e presentano problematiche di natura applicativa [9]. Fra le diverse tipologie di sistemi di monitoraggio del sottocassa treno vi sono l'analisi delle immagini multispettrali e/o a raggi infrarossi (IR) [10].

Il sistema di rilevamento termico del sottocassa treno può rappresentare una soluzione per la prevenzione di incendi e di tutte le anomalie dovute al raggiungimento di una temperatura critica da parte di un organo meccanico (fig. 2).

Il sistema RTST è stato messo in servizio a fine 2011 da AMT-Genova S.p.A sulla linea metropolitana Genova Brignole-Certosa, nelle vicinanze della stazione di Dinegro con ottimi risultati in termini di affidabilità.

Il report di manutenzione in fig. 3, mette in evidenza le anomalie termiche rilevate durante l'esercizio che hanno portato all'arresto dei convogli allarmati e in alcuni casi attivato l'intervento dei manutentori prima che l'elemento allarmato si degradasse in modo definitivo.

Il Sistema RTST è stato progettato per adempiere le seguenti funzioni:

- rilevare eventuali anomalie termiche del convoglio in transito;
- allertare automaticamente gli operatori che eseguono una verifica del veicolo;

an underground rolling stock using non-invasive techniques.

The project idea came to light following the solicitation of the Ministry of Infrastructures and Transport to supplement the usual safety systems and plans with newer ones using modern innovative techniques for risk mitigation. Trying to determine the possible fire triggering elements, it is much easier to take the appropriate actions before a fire takes place. In Europe, the railways of the various Member States are increasingly interested in automated inspection technologies that overcome the problems of the current manual techniques [8].

In this context there is a will to introduce a thermal control system that must automatically reveal a series of possible abnormal temperature situations of convoys in transit.

The primary goal is to improve the level of safety of underground circulation, increasing protection against faults or malfunctions of rolling stock, which are the most frequent cause of fire (as mentioned in §2 and §3). The most advanced monitoring systems guarantee fault detection and protection of railway assets through sophisticated methods of data filtering, system identification and signal analysis; however, due to the considerable complexity of railway systems, these technologies are often limited and involve application problems [9]. Among the different types of monitoring systems of the train underbodies, there is the analysis of multispectral and/or infrared rays (IR) images [10].

The thermal measurement system of the train underbody may be a solution for the prevention of fires and of all anomalies due to a mechanical part reaching a critical temperature (fig. 2).

AMT-Genova S.p.A put the RTST system into service at the end of 2011 at the underground line Genoa Brignole-

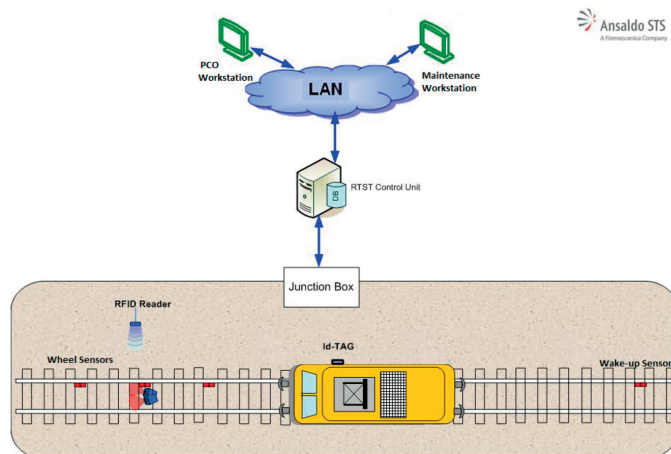


Fig. 2 - Layout del sistema RTST installato presso la stazione di Dinegro.
Fig. 2 - RTST system layout installed at Dinagro station.

- fornire un significativo supporto alle attività di manutenzione preventiva, correttiva e nelle fasi di programmazione della manutenzione.

Il Sistema Rilevamento Temperatura Sottocassa Treno permette di migliorare le attività di manutenzione:

- rilevando i treni che presentano un determinato numero di segnalazioni sullo stesso elemento;
- consentendo di impostare correttamente la frequenza dei cicli di manutenzione in funzione dell'analisi dei dati storici del sistema.

L'analisi dei dati statici ottenuti nella fase di rilevazione n°1 (con soglie termiche di calibrazione minori di quelle teoriche) e quelli ottenuti nella fase di rilevazione n°2 (con soglie termiche teoriche impostate sulla base del capitolato di gara) ha messo in risalto i benefici che il sistema RTST ha apportato per le attività di manutenzione in termini di costi e di prevenzione del rischio incendio.

6. Struttura modulare

Il sistema RTST è costituito da una serie di sensori installati in una Zona di Misura ben definita e di elaboratori dedicati all'acquisizione, elaborazione e memorizzazione dei dati di campo (fig. 2).

Due postazioni Operatore, una situata al Posto Centrale Operativo (PCO) di Brin e l'altra presso i locali ma-

Certosa (Metro Genoa) in the vicinity of Dinegro station with excellent results in terms of reliability.

The maintenance report in fig.3, highlights the thermal anomalies detected during the exercise that led to the arrest of the convoys alarmed and in some cases triggered the intervention of maintenance before the item is alarmed degrade permanently .

The RTST System was designed to fulfill the following functions:

- *detect any thermal anomaly of the trainset in transit;*
- *automatically alert operators to perform a vehicle check;*
- *provide significant support to corrective and preventive maintenance activities during maintenance programming.*

The Temperature Measurement System of the Train Underbody allows improving maintenance activities:

- *detecting trains with a certain number of reports on the same element;*
- *correctly setting the frequency of maintenance cycles on the basis of system historical data analysis.*

The analysis of static data obtained in measurement phase 1 (with calibration thermal thresholds less than theoretical ones) and those obtained during measurement 2 (with theoretical thermal thresholds set based on the tender specifications) has highlighted the benefits that the RTST system brought for maintenance tasks in terms of costs and fire risk prevention.

6. Modular structure

The RTST system consists of a series of sensors installed in a well-defined Measurement Area and of computers dedicated to capturing, processing and storing data (fig. 2).

Two Operator stations, one located at the Operations Central Point (PCO) of Brin and the other at Dinegro maintenance facilities allow monitoring the system in real time.

The measurement area is placed before the Dinegro station (in the Principe-Brin direction), so that any thermal anomalies of the trainset in transit are detected before the vehicle transit in the Certosa gallery allowing to carry out manoeuvre operations and stopping the train at the platform.

The RTST system has a modular architecture with the following features:

- *rolling stock identification;*
- *RFID identification;*
- *thermographic scan.*

Unità di trazione <i>Traction unit</i>	Elemento <i>Element</i>	Transiti Allarmati <i>Alerted transits</i>	% Transiti Allarmati <i>% Alerted transits</i>
12	Compressore aria <i>Air compressor</i>	3	6,00%
15	Disco freno <i>Braking disc</i>	8	16,00%
	Motore <i>Engine</i>	8	16,00%
	Riduttore <i>Adaptor</i>	8	16,00%
	Sottocassa generico <i>Generic underbody</i>	8	16,00%
17	Compressore aria	8	16,00%
2	Riduttore <i>Adaptor</i>	3	6,00%
4	Riduttore <i>Adaptor</i>	1	2,00%
6	Riduttore <i>Adaptor</i>	1	2,00%
	Sottocassa generico <i>Generic underbody</i>	2	4,00%

Fig. 3 - Report di manutenzione per singole componenti del rotabile.

Fig. 3 - Maintenance reports for individual components of the rolling stock.

nutrizione di Dinegro permettono di monitorare in tempo reale il sistema.

La zona di rilevamento è collocata prima della stazione di Dinegro (nella direzione Principe-Brin), in modo tale che le eventuali anomalie termiche del convoglio in transito vengono rilevate prima del transito del veicolo nella galleria di Certosa permettendo di effettuare operazioni di manovra e fermare il treno in banchina.

Il sistema RTST presenta un'architettura modulare con le funzionalità di:

1. riconoscimento rotabili;
2. identificazione RFID;
3. scansione termografica.

6.1. Modulo "riconoscimento rotabili"

Il modulo "riconoscimento rotabili" permette di rilevare, attraverso una distribuzione di sensori ruota (fig.4) le caratteristiche del treno in transito in termini di distribuzione temporale degli assi.

Analizzando i dati temporali di transito di tutti gli assi del treno su tutti i sensori ruota, l'elaboratore ricava l'effettiva velocità istantanea del treno in transito, rilevando anche eventuali variazioni dovute ad accelerazioni o frenature.

Confrontando la distribuzione spaziale degli assi transitati con la tipica distanza tra le ruote delle varie tipologie di unità di trazione costituenti il parco rotabile, è possibile riconoscere le singole unità di trazione transitate.

Inoltre, il modulo "riconoscimento rotabili" genera un segnale di sincronismo che inizia nell'istante in cui il sistema rileva la presenza del treno nella Zona di Misura e termina alla fine del transito.

Tale segnale viene inoltrato ai sensori termografici che marcano temporalmente tutte le acquisizioni effettuate.

6.2. Modulo "identificazione RFID"

Il sistema d'identificazione a radio frequenza (RFID) permette di riconoscere ciascuna unità di trazione (per ogni singolo convoglio in transito all'interno della Zona di Misura), al fine di garantire la corretta associazione della misura della temperatura del sottocassa al relativo rotabile.

Il sistema di identificazione è sostanzialmente costituito da due componenti:

- *Tag*: elemento passivo, attivato al passaggio del treno nell'area di copertura del Tag-Reader; tempi di risposta brevi, associati univocamente ad un codice pre-programmato dalla Casa costruttrice. Codifica e rinvia il segnale di interrogazione emesso dal Tag-Reader;

6.1. "Rolling stock identification" module

The rolling stock recognition module allows detecting, through a distribution of wheel sensors (see fig. 4), train characteristics in terms of axes distribution time.

Analysing the temporal transit data of all train axes on all wheel sensors, the computer derives the actual speed of the train in transit, also detecting any variations due to acceleration or braking.

By comparing the spatial distribution of the transited axes with the typical distance between the wheels of different types of traction units making up the rolling stock fleet, we can recognise the individual traction units that have transited.

In addition, the module "award rolling stock" generates a sync signal that starts when the system detects the presence of the train in the area of Measurement and ends at the end of the transit. This signal is forwarded to the thermograph sensors that temporally mark all acquisitions made.

6.2. "RFID identification" module

The radio frequency identification device (RFID) allows recognising each traction unit (for each convoy in transit within the Measuring Area), in order to ensure the correct temperature measurement association of the underbody to the related rolling stock.

The identification system is basically made up of two components:

- *Tags: passive element, enabled at the transit of the train in the coverage area of the Tag-Reader, short response times, uniquely associated to a code pre-programmed by the Manufacturer. It encodes and defers the interrogation signal emitted by the Tag-Reader;*
- *Tag-Reader or Antenna: it performs the reading of the*



Fig. 4 - Modulo Riconoscimento Rotabili: sensori di ruota.
Fig. 4 - Rolling stock Recognition Module : wheel sensors.

- *Tag-Reader o Antenna*: effettua la lettura del Tag associato al rotabile in transito in una determinata area di copertura, attraverso un segnale di interrogazione a radiofrequenza che viene ricevuto dal Tag. Demodula il segnale di ritorno ed estrae le informazioni contenute, rendendole disponibili all'Elaboratore di Acquisizione che le associa alla singola unità di trazione (fig. 5).

Ogni singola unità di trazione in esercizio sulla linea metropolitana AMT Genova è identificata da uno specifico N° identificativo (detto anche N° matricola): su ciascuna di esse viene installato un apposito Tag (in posizione centrale rispetto al convoglio e ad una altezza Y dal piano del ferro).

L'associazione tra il numero identificativo del rotabile ed il numero identificativo Tag è memorizzata elettronicamente dal sistema.

Tale associazione viene eseguita sia per i rotabili di prima che di seconda generazione.

Il Tag-Reader è installato e posizionato all'interno della Zona di Misura del Sistema RTST con specifiche caratteristiche installative determinate in sede di progettazione e in funzione alle esigenze di campo.

6.3. Modulo "Termografico"

Il modulo Termografico, denominato "IRS 350-2" prodotto da EAT s.r.l. (fig. 6), acquisisce mappe ad alta definizione delle superfici visibili dell'intero sottocassa del convoglio in transito per rilevare una serie di difetti che possono essere associati a temperature anomale.

Questo sotto-sistema può essere quindi considerato come un valido sostituto e come una estensione su tutta la superficie del sottocassa del veicolo della consolidata funzione svolta dai sistemi Hot Box Detection e Hot Wheel Detection, rispettivamente attuali sistemi di monitoraggio termografico delle boccole e delle ruote di ciascun asse dei convogli ai fini della prevenzione e protezione da incendio.

Il sistema termografico utilizza la tecnologia a scansione lineare allo scopo di effettuare una misurazione termica ad alta definizione dell'intero sottocassa del convoglio in transito. Lo scanner infrarosso lineare è un dispositivo di tipo embedded (fig. 7), ad alta risoluzione geometrica (256 pixel), ad alta velocità di campionamento (2000 linee/s) con ampio range di temperatura basato su



Fig. 5 - Modulo Identificazione RFID: Tag Reader.
Fig. 5 - RFID Identification Module: Tag Reader.

Tag associated with the rolling stock in transit in a particular area of coverage, through a radio-frequency interrogation signal that is received by the Tag. It demodulates the return signal and extracts the information contained making it available to the Acquisition Processor that associates them to the individual traction unit (fig. 5).

Each traction unit operating on the AMT Genoa underground line is identified by a specific identification number (also called registration number): a special Tag is installed on each one of them (in a central position with respect to the convoy and at a height from the upper surface of the rail).

The system electronically stores the association between the identification number of the rolling stock and the Tag identification number.

This association is used for both first and second-generation rolling stock.

The Tag-Reader is fixed within the measuring Area of the RTST System with specific installation characteristics determined in the design and in relation to the needs of field.

6.3. "Thermographic" Module

The Thermographic module, called "IRS 350-2" manufactured by EAT s.r.l. (fig. 6), captures high-resolution maps of the visible surfaces of the entire underbody of the trainset in transit to detect a number of defects that can be related to abnormal temperatures.

This sub-system can therefore be considered as a valid substitute and as an extension over the entire surface of the vehicle underbody of the consolidated function performed by the Hot Box Detection and Hot Wheel Detection systems, respectively current thermographic monitoring systems of the bushings and of the wheels of each axle of trainsets for the prevention and protection from fire.

The thermographic system uses a linear-scan technology in order to carry out a high-definition thermal measurement of the entire underbody of the trainset in transit. The linear infrared scanner is an embedded device (fig. 7), with geometric high-resolution (256 pixels), high-speed sampling (2000 lines/s) with wide temperature range based on a sensitive sensor in the mid infrared band wavelength (Mid-Infrared Wave - MWIR).

Given the linear and non-arrayed nature of the sensor, the individual lines acquired to rebuild a complete picture must be aligned and merged.

The acquisition in the infrared field allows the device to generate heat maps of vehicles transiting at different speeds thanks to a synchronisation of the acquisition with the speed of the vehicle itself.

The synchronism signal allows marking data temporally,

un sensore sensibile nella banda di media lunghezza d'onda nell'infrarosso (Mid Wave InfraRed -MWIR).

Data la natura lineare e non matriciale del sensore occorre allineare e unire le singole righe acquisite per ricostruire una immagine completa.

L'acquisizione nel campo dell'infrarosso permette al dispositivo di generare mappe termiche di mezzi transitanti a velocità variabile grazie ad una sincronizzazione dell'acquisizione con la velocità del mezzo stesso.

Il segnale di sincronismo consente di marcare temporalmente i dati, in modo da consentire, nella presentazione all'Operatore, la ricostruzione dell'immagine termica adeguatamente proporzionata corrispondente al singolo veicolo.

I termografi rilevano le temperature superficiali effettive di elementi appartenenti al sottocassa dei veicoli, con un alto livello di precisione e di risoluzione nonostante spesso esse siano caratterizzate da fattori attenuanti, quali la velocità del treno, materiale costitutivo dell'elemento, fattori atmosferici, l'interazione e la propagazione del calore fra gli elementi.

7. Elaborazione dati

Il sistema RTST è basato su una architettura di tipo "client-server" (fig. 2).

Il Server Web è l'unità centrale destinata alla raccolta e gestione dei dati e alle funzioni di elaborazione degli stessi.

I "Client" sono unità di elaborazione che constano di Interfacce Web Operatore di tipo grafico, collegate al server web per ottenere i servizi di archiviazione dati ed elaborazioni necessarie.

Il sistema inizia l'elaborazione durante il transito dei primi assi del convoglio, e la completa immediatamente dopo il transito del treno nella Zona di Misura, in tempo utile per segnalare gli allarmi.

I tempi di passaggio degli assi sulla serie di sensori di ruota nella Zona di Misura sono utilizzati per calcolare il passo degli assi e la cinematica degli stessi lungo il binario mediante un algoritmo idoneo allo scopo.

Le distanze tra gli assi sono il principale input dell'applicativo software che analizza la composizione del convoglio, individuando e classificando le singole unità di trazione.

Per ogni unità viene acquisita un'immagine termica che permette di analizzare ciascun elemento del sottocassa e ottenere informazioni sulla distribuzione termica del veicolo in transito.

so that, in the presentation to the Operator, the reconstruction of the thermal image adequately proportioned corresponds to the single vehicle.

Thermographs detect the actual surface temperature of elements belonging to the vehicle underbody, with a high degree of accuracy and resolution although they are often characterised by mitigating factors such as the speed of the train, the constitutive material of the item, atmospheric factors, interaction and the propagation of heat between elements.

7. Data processing

The RTST system is based on a "client-server" type of architecture (fig. 2).



Fig. 6 - Modulo Termografico: IRS 350-2.
Fig. 6 - Thermograph Module: IRS 350-2.



Fig. 7 - Installazione Termografo del Sistema RTST.
Fig. 7 - RTST system thermograph installation.

I dati di profilo termico vengono successivamente filtrati con un algoritmo che consente di eliminare le rilevazioni anomali che potrebbero causare falsi allarmi.

Durante il transito il sistema produce anche l'autodiagnostica dei sensori e degli elaboratori.

Infine attraverso la realizzazione di un'interfaccia utente viene presentata all'Operatore l'immagine termografica con le seguenti informazioni:

- indicazione della direzione di transito;
- una scansione CAD relativa al sottocassa;
- la legenda che permette di identificare la corrispondenza tra i colori e le temperature rilevate;
- un'unica immagine termografica in falsi colori del sottocassa;
- lo zoom dell'immagine termografica.

8. Analisi immagini termografiche

L'immagine termografica acquisita dal sensore infrarosso e ricostruita con l'ausilio dei tempi di acquisizione stessi rappresenta la mappa termica dell'oggetto inquadrato.

Su questa mappa sono rappresentate le temperature rilevate degli organi che compongono il sottocassa nella stessa posizione in cui gli organi sono dislocati.

La temperatura è rappresentata da un differente livello di grigio compreso da 0 (nero = punto più freddo) a 254 (bianco = punto più caldo), corrispondenti all'intervallo tra le temperature minima e massima del range di misura (50-450 °C), più il livello 255 dedicato alla marcatura delle criticità.

Attraverso la configurabilità elevata, il Sistema RTST è in grado di applicare una suddivisione termografica dell'immagine acquisita con la costituzione funzionale degli elementi scansionati, e quindi di identificare e trattare in modo differenziato i vari organi del sottocassa del rotabile da monitorare. Sulle immagini è possibile individuare la posizione e la tipologia degli elementi, identificando quelli che presentano una maggiore criticità a livello termico che potrebbero compromettere il funzionamento del rotabile e provocare una condizione di pericolo per la circolazione.

Questi elementi (motori, riduttori, compressore aria e dischi freno) devono essere monitorati con particolare attenzione perché soggetti a surriscaldamento, e gli eventi di allarme possono essere individuati tramite l'analisi delle temperature.

Tramite un algoritmo di conversione tali immagini vengono rielaborate in falsi colori per fornire all'Utente un'interfaccia di tipo user-friendly (fig. 8): l'utilizzo di colori per indicare le temperature (tonalità fredde come il blu per le temperature più basse, tonalità calde come il rosso per valori più alti) consente di effettuare un'analisi preliminare dei pericoli già ad occhio nudo.

The Web Server is the central unit for the collection and management of data and processing functions.

"Clients" are processing units that consist of graphical Operator Web interfaces connected to the web server to obtain the data storage and necessary processing services.

The system starts processing during transit of the first axle of the convoy, and completes it immediately after the train transit in the Measuring Area, in time to signal alarms.

The axle transit times on the set of wheel sensors in the Measuring Area are used to calculate the pitch of the axles and kinematics along the track using an algorithm suitable for this purpose.

The distances between the axles are the main input of the software application that analyses the composition of the convoy, identifying and classifying the individual traction units.

A thermal image is captured for each unit that allows analysing each underbody item and retrieving information on the thermal distribution of the vehicle in transit.

Thermal profile data are then filtered with an algorithm that clears abnormal readings that might cause false alarms.

During transit, the system also produces self-diagnosis of sensors and computers.

Finally, through the creation of a user interface, the thermal image is presented to the operator with the following information:

- indication of direction of transit;
- underbodies CAD scan;
- a legend that allows identifying the correspondence between colours and temperatures measured;
- single thermal image in false colours of the underbody;
- thermographic image zoom.

8. Thermographic images analysis

The thermal image acquired by the infrared sensor and rebuilt with the help of the same acquisition time is the thermal map of the object framed. On this map are represented the detected temperatures of the elements which compose the underbody in the same position in which the bodies are located.

The temperature is represented by a different grey level ranging from 0 (black = coldest point) to 254 (white = hottest point), corresponding to the range between the minimum and maximum temperatures of the measuring range (50-450° C), plus level 255 dedicated to the marking of criticalities.

Through high configurability, the RTST system can apply a thermal breakdown of the image acquired with the functional constitution of scanned items, and therefore identify and treat differently the various parts of the underbody of the rolling stock to be monitored. The position and the type of the elements can be identified on the images,

Organi a differenti temperature sono rappresentati quindi come aree di differente colore o intensità di bianco sull'immagine complessiva del sottocassa.

La generazione di allarmi termografici avviene suddividendo l'immagine in zone di forma arbitraria e verificandone all'interno di ogni cella il superamento dei vincoli imposti. I vincoli sono collegati alla temperatura (soglie termiche) ed alla forma e dimensione delle macchie termiche presenti.

9. Definizione allarmi

Per ogni elemento sono state definite due soglie di allarme:

- *Allertamento o Warning (Allarme lieve)*: non prevede interventi immediati, si avverte l'Operatore che si sta superando la temperatura normale di utilizzo, ma non si è ancora in fase critica; tale situazione di allarme è segnalata da luce gialla sulla lista transiti dell'interfaccia operatore;
- *Imperativo (Allarme Grave)*: prevede l'arresto immediato del treno, in quanto il rischio di incendio è elevato; tale situazione di allarme è segnalata da luce rossa sulla lista transiti dell'interfaccia operatore ed è accompagnato da avviso acustico.

Le soglie di allarme dei singoli elementi del sottocassa ed eventuali altri parametri determinanti per la generazione di un allarme sono configurabili, in modo da rendere selettiva la discriminazione automatica dei livelli di allarme.

Sulle immagini termografiche le aree con le temperature anomale vengono rappresentate da macchie di colore circondate da ellissi a tratto continuo per gli allarmi gravi (Imperativi) o a tratto discontinuo per gli allarmi lievi (Allertamenti).

La determinazione di tali soglie si è svolta in più fasi, dall'installazione del sistema RTST sull'impianto di Genova ad oggi.

Inizialmente il sistema è stato calibrato con soglie di allarme che rispettavano le indicazioni del capitolato.

Non essendo presenti in letteratura dati precisi di temperatura applicabili per definire con precisione le soglie di allarme degli elementi analizzati, si è dovuto monitorare con attenzione il comportamento degli elementi dei treni (di prima e seconda generazione).

L'applicazione delle soglie di capitolato ed il monitoraggio hanno evidenziato la necessità di definire sul campo le soglie di allarme (fig. 9).

identifying those that have greater thermal level criticality that could affect the operation of the rolling stock and cause a dangerous condition for circulation.

These elements (motors, reducers, air compressor and brake disks) must be monitored with particular attention because subject to overheating and alarm events can be identified through the analysis of temperatures.

Using a conversion algorithm these images are re-worked into false colours to provide the dispatcher with a user-friendly interface (fig. 8): the use of colours to indicate temperatures (cold colours such as blue for lower temperatures, warm colours such as red for higher values) provides a preliminary analysis of the dangers already with the naked eye.

Bodies at different temperatures are therefore represented as different colour or white intensity areas of the overall image of the underbody.

Thermograph alarms generation occurs by splitting the image into arbitrary shape areas and checking the overrun of the constraints imposed inside every cell. Constraints are related to temperature (thermal thresholds) and shape and size of the thermal spots present.

9. Alarm definition

Two alarm thresholds have been defined for each item:

- *Alert or Warning (minor Alarm)*: no immediate action, it warns the operator that the normal temperature of use is being overrun, but with no critical phase yet; this alarm situation is indicated by the yellow light on the operator interface transits list;

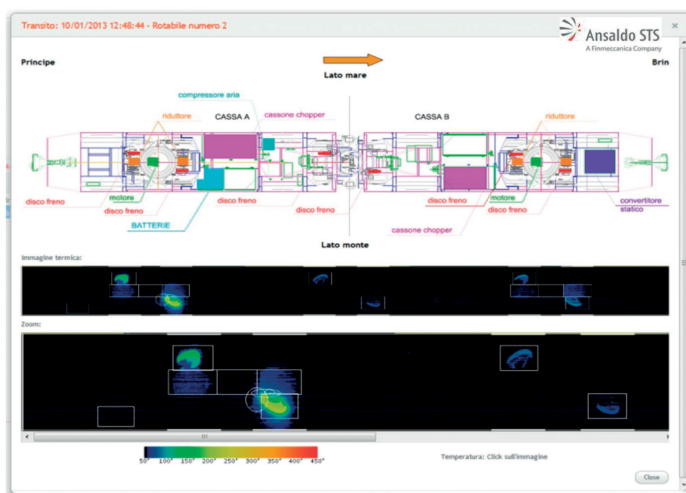


Fig. 8 - HMI visualizzazione allarmi.
Fig. 8 - HMI alarms visualisation.

10. Modulo di statistica

Un valore aggiunto è dato dal sistema di statistica che permette di analizzare gli allarmi, registrati in un determinato periodo temporale scelto dall'Operatore, e determinare classi statistiche in relazione alla percentuale dei transiti, dei modelli dei rotabili, del numero di identificativo dei rotabili e della tipologia di organo meccanico attraverso il sistema RFID.

Il sistema di statistica, basato su applicativo Oracle, consente di analizzare i dati rilevati con le relative percentuali per:

- treno;
- carro;
- singolo organo del sottocassa monitorato (dischi freno, boccole interne, riduttori, motori di trazione, compressore d'aria, batterie, cassone chopper, convertitore statico).

Il sistema archivia tutti i transiti, gli allarmi e le immagini termografiche nel proprio database consentendo al manutentore di condurre un'analisi statistica del comportamento delle unità di trazione e di ricavare informazioni utili per affinare il programma di manutenzione.

Come riportato nelle figg. 9 e 10, il sistema statistico è composto da diversi filtri (arco temporale, unità di trazione, componente sottocassa e tipologia di allarme generato) per poter delimitare la popolazione statistica, monitorando i transiti in funzione della data/ora di transito, del numero di unità di trazione e della categoria in cui il rotabile è stato classificato (prima e seconda generazione), della temperatura rilevata per ogni componente e della tipologia di allarme generato (lieve/grave, organo coinvolto).

L'operatore può definire il periodo temporale in cui effettuare la ricerca e valutare:

- la percentuale dei transiti suddivisi in base alla massima severità di allarme riscontrato per ogni passaggio;
- la percentuale di transiti con generazione di allarmi distinti per tipologia di veicolo;
- la percentuale di transiti con generazione di allarmi distinti per unità di trazione;
- la percentuale dei transiti con generazione di allarmi distinti per elementi del rotabile interessato;
- report che riporta in forma tabellare l'indicazione di transiti per cui un rotabile ha riportato degli allarmi, con indicazione della data e ora del transito e severità dell'allarme riscontrato e l'elemento che ha generato una situazione di allarme.

11. Algoritmo a posteriori di analisi delle temperature

Per definire soglie di allarme più precise è stato realizza-

- Imperative (serious Alarm): *provides for the immediate stop of the train, as the risk of fire is high; this alarm situation is signalled by the red light on the operator interface transit list and is accompanied by an acoustic warning.*

Alarm thresholds for individual elements of the underbody and any other parameters affecting the generation of an alarm can be configured so as to make automatic discrimination of alarm levels selective.

On thermographic images, areas with abnormal temperatures are represented by coloured spots surrounded by a continuous line ellipsis for serious alarms (Imperative) or discontinuous line for minor alarms (Alerts).

The determination of these thresholds was carried out in multiple phases by the RTST system installation in Genoa.

Initially the system was calibrated with alarm thresholds that met the specifications.

Since there was no availability of precise temperature data in literature applicable to defining the alarm thresholds of the elements analysed, the behaviour of train elements (first and second generation) had to be carefully monitored.

The application of specifications thresholds and monitoring has highlighted the need to define alarm thresholds in the field (fig. 9).

10. Statistics module

Added value is given by the statistics system that allows analysing alarms recorded over a certain period of time chosen by the Operator, and determining statistic classes relating to the percentage of transits, of rolling stock models, of identification number of rolling stock and the type of mechanical part through the RFID system.

The statistics system, based on an Oracle application, allows analysing the data collected with the corresponding percentages for:

- train;
- wagon;
- single part of the monitored underbody (brake discs, internal bushings, reducers, traction motors, air compressor, batteries, chopper body, static converter).

The system stores all transits, alarms and thermographic images in its database allowing the maintainer to conduct statistical analysis of the behaviour of the traction unit and to obtain information to help refine the maintenance programme.

As shown in figs. 9 and 10, the statistics system is composed of several filters (time span, traction unit, underbody component and type of alarm generated) to restrict the statistics population, monitoring transits according to the

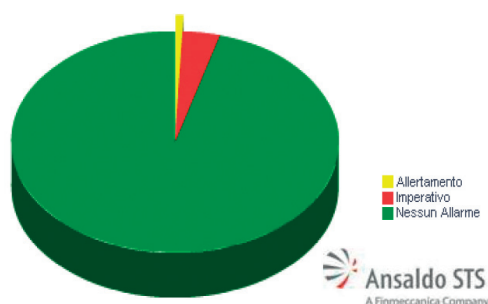


Fig. 9 - Report Statistica - Percentuale Transiti Allarmati.
Fig. 9 - Statistics Report – Percentage of alarmed transits.

to, in collaborazione con l'Università degli Studi di Genova, un algoritmo che analizza a posteriori le temperature rilevate in campo. Tale algoritmo sviluppato in Matlab è in grado di interagire con il database di statistica.

Per ogni transito l'algoritmo analizza le immagini grezze (a livelli di grigio), definendo delle sottomatrici di pixel, corrispondenti ad ogni elemento del sotto cassa monitorato.

Ogni sottomatrice viene esaminata pixel per pixel per ricavare il valore massimo, il valore minimo, il valor medio dei livelli di grigio di ogni componente e la percentuale di zona surriscaldata rispetto al totale di ogni elemento.

I dati ottenuti in pixel vengono convertiti in valori reali di temperatura in °C tramite la formula:

$$T = (g/254) * (tmax - tmin) + tmin \quad (1)$$

dove:

T = temperatura del pixel [°C];

g = livello di grigio;

tmax = temperatura massima di calibrazione [°C];

tmin = temperatura minima di calibrazione [°C].

Come parametri di riferimento più significativi per la definizione delle soglie di allarme sono state utilizzate le temperature massime rilevate su ogni cella termica dell'area di scansione (a forma quadrata) per ciascun organo meccanico ed elettrico del sottocassa;

Ai fini diagnostici e di analisi, sono stati presi in esame 15 convogli (6 di prima generazione e 9 di seconda generazione) e sono stati misurati i seguenti componenti del rotabile:

- tre coppie di dischi freni;
- due coppie di riduttori di velocità;

date/time of transit, the number of traction units and the category in which the rolling stock has been classified (first and second generation), the temperature measured for each component and the type of alarm generated (mild/severe, component involved).

The Operator can define the time period to search and evaluate:

- the percentage of transits according to the most serious alarm found for each transit;
- the percentage of transits with alarms generation by type of vehicle;
- the percentage of transits with alarms generation by traction units;
- the percentage of transits with alarms generation by elements of the rolling stock involved;
- report that shows the indication of transits for rolling stock- alarm, with indication of the date and time of transit and alarm severity found and the element that generated an alarm situation.

11. Temperature analysis a posterior algorithm

To define an even more precise alarm threshold an algorithm that analyses the temperatures measured a posteriori was created in collaboration with the University of Genoa.. This algorithm developed in Matlab can interact with the statistics database.

The algorithm analyses the raw images (at grey levels) for each transit, defining the pixel sub-arrays corresponding to each element of the monitored underbody.

Each sub-array is examined pixel by pixel to derive the maximum value, the minimum value, the average value of the

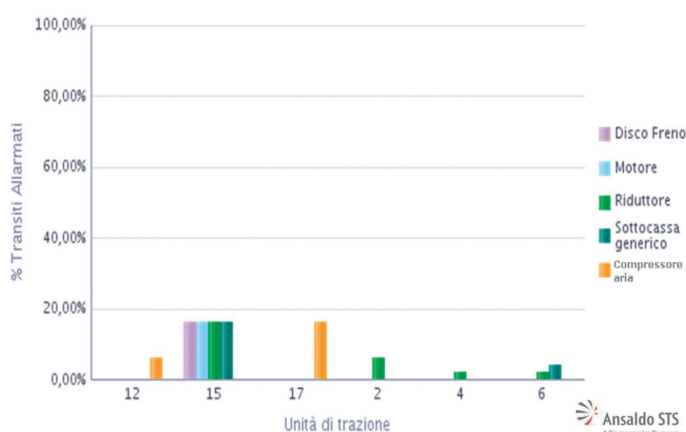


Fig. 10 - Report Statistica - Transiti allarmati distinti per unità di trazione.
Fig. 10 - Statistics Report – Alarmed transits sorted by traction unit.

- due motori di trazione;
- un convertitore statico.

La tabella in fig. 11 si riferisce al monitoraggio dei primi 10 transiti sui 516 compiuti dal rotabile n°11 (avvenuti dal 1 al 30 Novembre 2012), in cui si riporta: sulle righe il numero identificativo treno, sulle colonne la temperatura massima e la temperatura minima, la temperatura media e la porzione surriscaldata (%) del componente del rotabile.

Inoltre con l'ausilio di applicativi statistici presenti nello Statistics Toolbox di Matlab, è stato possibile raccogliere e analizzare i dati storici rilevati per un certo gruppo di elementi.

Applicando la "Teoria dei valori estremi, ovvero l'insieme di procedure scientificamente e statisticamente razionali utili a stimare il comportamento estremo di variabili o processi casuali" ([11] Coles, 2001), è stato possibile determinare i valori di temperatura per le soglie di allertamento.

"Date n variabili casuali indipendenti e identicamente distribuite (i.i.d.) X_1, X_2, \dots, X_n , (nel nostro lavoro le temperature massime), da una distribuzione $G(\cdot)$, il punto di partenza per l'analisi dei valori estremi è lo studio del comportamento di":

$$M = \max \{ X_1, X_2, \dots, X_n \} \quad (2)$$

dove M è l'Ordine Statistico Massimo.

Per affinare l'analisi è stato necessario considerare diverse caratteristiche, presenti nelle tre funzioni di distribuzione di:

- *Gumbel*: che permette di modellare la distribuzione del massimo numero di campioni, che possono essere estratti da distribuzioni diverse e predire la probabilità di accadimento di eventi estremi;
- *Weibull*: che permette di effettuare un'analisi di affidabilità, come il calcolo della durata media di un dispositivo;

	Max T °C	Min T °C	Mean T °C	%
MGE100201211011134100	59,44882	50	50,0712123	2,951699463
MGE100201211011206390	53,14961	50	50,0305744	2,617021277
MGE100201211011239000	59,44882	50	50,2021351	12,668566
MGE100201211011311440	64,17323	50	50,4404389	16,2962963
MGE100201211011344530	61,02362	50	50,4129921	16,63817664
MGE100201211011418420	62,59843	50	50,5021276	22,41215575
MGE100201211011455200	62,59843	50	50,4773773	19
MGE100201211011528580	64,17323	50	50,7786039	31,75308642
MGE100201211011602570	59,44882	50	50,6503002	26,86419753
MGE100201211011637050	65,74803	50	50,8296314	34,01923077

Fig. 11 - Report relativo alle misure di temperatura per transiti di Novembre 2012.

Fig. 11 - Reports on temperatures measures for November 2012 transits.

grey levels for each component and the overheated area percentage compared to the total of each item.

The data obtained in pixels are converted to actual temperature values in °C by means of the formula:

$$T = (g/254) * (t_{max} - t_{min}) + t_{min} \quad (1)$$

where:

T = pixel temperature [° C];

g = grey level;

t_{max} = calibration maximum temperature [° C];

t_{min} = calibration minimum temperature [° C];

As most significant parameters for defining alarm thresholds, maximum temperatures measured on each thermal cell of the scan area have been used (square-shaped) for each mechanical and electrical part of the underbody;

For diagnosis and analysis, 15 trainsets were examined (6 of first generation and 9 of second generation) and the following components of the rolling stock were measured:

- three pairs of brake discs;
- two pairs of speed reducers;
- two traction motors;
- one static converter.

The table in fig. 11 refers to the monitoring of the first 10 transits on 516 made by rolling stock n. 11 (occurring from November 1 to 30, 2012), which shows the train identification number on the lines, the maximum temperature and the minimum temperature, the average temperature and the overheated portion (%) of the rolling stock component in the columns.

Moreover, with the help of statistical applications in the Matlab Statistics Toolbox, it was possible to collect and analyse the historical data collected for a certain group of elements.

By applying the "Extreme value theory — the set of scientifically and statistically rational procedures useful to estimate the extreme behaviour of variables or causal processes" (Coles, 2001), the temperature values for alarm thresholds was determined.

"Given independent random identically distributed variables (i.i.d) X_1, X_2, \dots, X_n , (in our work the maximum temperatures), from a distribution $G(\cdot)$, the starting point for the analysis of extreme values is the study of the behaviour of":

$$M = \max \{ X_1, X_2, \dots, X_n \} \quad (2)$$

where M is the maximum statistical order.

To refine the analysis it was necessary to consider several features present in the three distribution functions:

- *Gumbel*: that allows modelling the distribution of the maximum number of samples that can be extracted

- *Frèchet*: per la regolarizzazione e normalizzazione dei massimi.

Esse sono state inglobate in un'unica funzione di distribuzione chiamata "Distribuzione generalizzata del valore estremo" (Generalized Extreme Value Distribution-GEV), anche conosciuta come distribuzione di Fisher-Tippett [11].

$$G(\chi) = \exp \left\{ - \left[1 + \epsilon \left(\frac{\chi - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{\epsilon}} \right\} \quad (3)$$

dove:

- σ è il parametro di scala: corrisponde alla deviazione standard delle temperature massime rilevate su tutti i componenti monitorati del singolo treno;
- α è il parametro di posizione: corrisponde alla media delle temperature massime rilevate su tutti i componenti monitorati del singolo treno;
- ϵ è il parametro di forma (shape parameter): corrisponde ai quantili della distribuzione; esistono tre possibili condizioni:
 - se $\epsilon < 0$ i quantili della distribuzione sono limitati, esiste e si può quindi calcolare il punto max della distribuzione dei massimi;
 - se $\epsilon = 0$ la distribuzione è illimitata da entrambe le parti;
 - se $\epsilon > 0$ la distribuzione non è limitata superiormente e tende a infinito.

Per la stima dei parametri della distribuzione GEV si possono utilizzare i seguenti metodi:

- Metodo dei Momenti;
- Metodo della Massima Verosimiglianza.

Il secondo risulta essere più efficiente ma presenta spesso difficoltà di risoluzione.

L'applicazione della funzione GEV ha permesso di ricavare una funzione di distribuzione di tipo Gaussiana, che ha come valore medio la posizione di concentrazione dei valori massimi del range di misura (compreso fra 50 °C e 450 °C) e come deviazione standard un valore di dispersione dei dati più significativi, utile per determinare il range di normale funzionamento degli elementi.

Prendendo come campione di riferimento la flotta di treni che è transitata nel periodo temporale scelto (scala mensile), la soglia di allertamento è stata definita secondo il seguente metodo:

- ipotizzata la distribuzione dei valori massimi di tipo GEV;
- definizione del criterio di analisi, dato dalla somma del valore medio con il doppio della deviazione standard;
- definizione dei valori del campione delle componenti

from different distributions and predict the probability of occurrence of extreme events;

- Weibull: that allows carrying out a reliability analysis, such as the calculation of the average duration of a device;
- Frèchet: for the regularisation and standardisation of the maximum values.

They were incorporated into a single distribution function called "Generalised extreme value distribution" (Generalized Extreme Value Distribution-GEV), also known as the Fisher-Tippett distribution [11].

$$G(\chi) = \exp \left\{ - \left[1 + \epsilon \left(\frac{\chi - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{\epsilon}} \right\} \quad (3)$$

where:

- σ is the scale parameter: it corresponds to the standard deviation of maximum temperatures detected on all monitored components of each train;
- α is the position parameter: it corresponds to the maximum temperatures detected on all monitored components of each train;
- ϵ is the shape parameter (shape parameter): it corresponds to the distribution quantiles; there are three possible conditions:
 - if $\epsilon < 0$ distribution quantiles are limited, the max point of the distribution of maximums exists and can therefore be calculated;
 - if $\epsilon = 0$ distribution is unlimited on both sides;
 - if $\epsilon > 0$ the distribution is not limited above and tends to infinite.

For the estimation of the parameters of the GEV distribution the following methods can be used:

- Method of Moments;
- Maximum Probability method.

The second is more efficient but often has resolution difficulties.

The application of the GEV function has allowed obtaining a Gaussian type distribution function, whose average value is the concentration values of the measuring range maximum values (between 50° C and 450° C and as standard deviation a dispersion value of more meaningful data, useful for determining the normal operation range of the elements.

Taking as reference sample the train fleet that has transited in the chosen time period (monthly scale), the alarm threshold has been defined according to the following method:

- Having assumed the distribution of the maximum GEV type values;

dei rotabili caratterizzate da un normale funzionamento;

- incremento del 10% di tali valori per la determinazione della soglia minima di temperatura che genera l'allarme imperativo (fermo immediato del treno).

12. Conclusioni

Attraverso l'algoritmo di analisi a posteriori, è stato possibile affinare al meglio i valori di allarme e nel contempo analizzare più dettagliatamente le caratteristiche di motori, riduttori, dischi freno e compressore ad aria.

L'analisi effettuata ha confermato che le temperature dei componenti meccanici del sottocassa dei treni erano state calibrate in modo ottimale con l'ausilio del modulo di statistica, mentre per quanto riguarda i dischi freni, i valori, erano stati settati su valori di soglia eccessivamente alti e quindi da ri-calibrare.

Pertanto, attraverso l'analisi a posteriori delle immagini termiche è stato possibile:

- ridefinire le soglie di alcuni elementi;
- riscontrare dettagli anomali che prima non erano stati evidenziati;
- fornire ai manutentori un riscontro delle reali temperature dei singoli componenti che possono generare allarmi, riducendo al minimo i falsi allarmi.

Infine nel corso del 2012 e nei primi mesi del 2013 il sistema Rilevamento Temperature Sottocassa dei Treni ha consentito ad AMT di mettere fuori servizio alcuni treni prima che si fermassero lungo la linea provocando possibili disservizi e creando problemi di sicurezza alla circolazione.

Analizzata l'apparecchiatura, che in tal caso era il compressore dell'aria di bordo, è stato individuato l'elemento causa della sovratemperatura; lo stesso è stato poi sostituito su tutti i treni del lotto.

- *analysis criterion definition, given by the sum of the average value with twice the standard deviation;*
- *definition of sample values of rolling stock components, characterised by normal operation;*
- *increase by 10% of these values for the determination of the minimum temperature threshold that generates imperative alarm (immediate train stop).*

12. Conclusions

Through the a posteriori analysis algorithm, it was possible to refine the alarm values and at the same time, analyse in more detail the characteristics of motors, reducers, brake discs and air compressor.

The analysis performed confirmed that the temperatures of the underbody mechanical components of the train were optimally calibrated with the help of the statistic model, while regarding the brake discs, the values were set on excessively high thresholds and therefore recalibration was necessary.

Therefore, through the a posteriori analysis of thermal imaging it was possible to:

- *redefine thresholds of certain elements;*
- *find abnormal details that previously had not been highlighted;*
- *provide feedback to maintainers of the real temperature of the individual components that can generate alarms, minimising false alarms.*

Finally, in the course of 2012 and in early 2013, the temperature detection underbody system of the trains has allowed AMT to put some trains out of service before they stop along the line leading to possible inefficiencies and creating safety problems for operation.

After analysing the equipment, which in this case was the on-board air compressor, the element causing overheating was singled out; the same was later replaced on all other trains.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] Alfredo CIGADA, Davide RUGGIERI, Emanuele ZAPPA, "Road and Railway Tunnel Fire Hazard: a New Measurement Method for Risk Assessment and Improvement of Transit Safety", IMS 2005 - IEEE International Workshop on Measurement Systems for Homeland Security, Contraband Detection and Personal Safety, Orlando, FL, USA, 29-30 March 2005.
- [2] D.M. 28/10/2005, "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie", G.U. 83 Aprile 2006, n. 89.
- [3] D.M. 11/01/1988 "Norme di prevenzione degli incendi nelle metropolitane", G.U. 2 Marzo 1988, n. 51.
- [4] D.M. 26/06/1984 - "Classificazione di reazione al fuoco e omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi", 26 Giugno 1984.

- [5] UNI CEI 11170-1, "Veicoli ferroviari - Linee guida per la protezione al fuoco dei veicoli ferroviari ed a via guidata", 30 Novembre 2005.
- [6] UNI CEI 11170-2, "Veicoli ferroviari - Linee guida per la protezione al fuoco dei veicoli ferroviari ed a via guidata - Accorgimenti progettuali - Misure di contenimento dell'incendio - Sistemi di segnalazione, controllo ed evacuazione", 30 Novembre 2005.
- [7] UNI CEI 11170-3, "Veicoli ferroviari - Linee guida per la protezione al fuoco dei veicoli ferroviari ed a via guidata - Valutazione del comportamento al fuoco dei materiali - Limiti di accettabilità", 30 Novembre 2005.
- [8] Narendra AHUJA, Christopher BARKAN, "Machine Vision for Railroad Equipment Undercarriage Inspection Using Multi-Spectral Imaging", Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 49, December 2007.
- [9] R.W. NGIGI, C. PISLARU, A. BALL, F. GU, "Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics", 25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering IOP Publishing, Journal of Physics-Conference Series 364, 2012.
- [10] J.M. HART, et al. "Machine Vision Using Multi-Spectral Imaging for Undercarriage Inspection of Railroad Equipment." Proceedings of the 8th World Congress on Railway Research, World Congress on Railway Research, Seoul, Korea, 2008.
- [11] Stuart COLES, "An Introduction To Statistical Modeling of Extreme Values", 2001.

LINEE GUIDA PER GLI AUTORI

(Istruzioni su come presentare gli articoli per la pubblicazione sulla rivista "Ingegneria Ferroviaria")

La collaborazione è aperta a tutti - L'ammissione di uno scritto alla pubblicazione non implica, da parte della Direzione della Rivista, riconoscimento o approvazione delle teorie sviluppate o delle opinioni manifestate dall'Autore - I manoscritti vengono restituiti.

La riproduzione totale o parziale di articoli o disegni è permessa citando la fonte.

La Direzione della Rivista si riserva il diritto di utilizzare gli articoli ricevuti e la documentazione ad essi connessa anche per la loro pubblicazione, in lingua italiana o straniera, su altre riviste del settore edite da soggetti terzi. In ogni caso, la pubblicazione degli articoli ricevuti, anche su altre riviste avverrà sempre a condizione che siano indicati la fonte e l'autore dell'articolo.

Al fine di favorire la presentazione delle memorie, la loro lettura e correzione da parte del Comitato di Redazione nonché di agevolare la trattazione tipografica del testo per la pubblicazione su "Ingegneria Ferroviaria", si ritiene opportuno che gli Autori stessi osservino gli standard di seguito riportati.

L'articolo dovrà essere necessariamente su supporto informatico, preferibilmente in formato WORD per Windows, accettato dalla redazione (e-mail, CD-Rom, DVD, pen-drive...).

Tutte le figure (fotografie, disegni, schemi, ecc.) devono essere progressivamente richiamate nel corso del testo. Le stesse devono essere fornite complete della relativa didascalia. Tutte le figure devono essere inserite su supporto informatico (e-mail, CD-Rom, DVD o Pen Drive) e salvate in formato TIF o EPS ad alta risoluzione (almeno 300 dpi). È richiesto inoltre l'invio delle stesse immagini in formato compresso JPG (max 50KB per immagine).

È consentito includere, a titolo di bozza di impaginazione, una copia cartacea che comprenda l'inserimento delle figure nel testo.

Si pregano i signori autori di utilizzare rigorosamente, nei testi presentati, le unità di misura del Sistema Internazionale (SI), utilizzando le relative regole per la scrittura delle unità di misura, dei simboli e delle cifre e di richiamare nel testo con numerazione progressiva tutti i riferimenti bibliografici.

All'Autore di riferimento è richiesto di indicare un indirizzo di posta elettronica per lo scambio di comunicazioni con il Comitato di Redazione della rivista e di sottoscrivere apposita liberatoria per la pubblicazione degli articoli.

Per eventuali ulteriori informazioni sulle modalità di presentazione degli articoli contattare la Redazione della Rivista - Tel. 06.4827116 - Fax 06.4742987 - redazioneif@cifi.it