DOTTORATO DI RICERCA IN INFRASTRUTTURE E TRASPORTI

SCHEDA PER L'AMMISSIONE AL III ANNO DI CORSO

Dottoranda: Eleonora Di Benedetto **Ciclo:** XXXV **Curriculum:** Infrastrutture, Sistemi di trasporto e Geomatica **Tutore:** Prof.ssa Mara Lombardi **Cotutore:** Prof. Massimo Guarascio

Argomento della ricerca: Alarp Risk Based Design: asphalt vs concrete paved tunnel comparative analysis / Progetto "Alarp Risk Based Gallerie": Esame progettuale comparativo tra pavimentazione in conglomerato bituminoso e calcestruzzo.

SEZIONE A
Ricerca di Dottorato

(massimo 5 pagine)

1 – Aggiornamento del programma logico e cronologico delle attività *(Precisazione del tema prescelto per la Tesi finale; inquadramento delle attività già svolte e da compiere nell'ultimo anno, con aggiornamento delle previsioni su obiettivi e metodologia; cronoprogramma).*

Il documento presenta la disamina delle attività di ricerca, formazione e approfondimento svolte durante il secondo anno di Dottorato. Il progetto di ricerca qui proposto si inserisce nell'ambito delle attività per il miglioramento della sicurezza delle infrastrutture stradali, in particolare per le gallerie.

Le gallerie costituiscono elementi singolari di un tracciato stradale, con carattere strategico dal punto di vista socio economico e di particolare rilievo dal punto di vista progettuale, con significative implicazioni sulla sicurezza. Possono essere sede dei cosiddetti eventi critici, tra cui gli eventi d'incendio, per i quali l'ambiente confinato della galleria determina per gli utenti rischi aggiuntivi rispetto a quelli connessi alla circolazione stradale nelle tratte a cielo aperto. La valutazione di tali rischi aggiuntivi costituisce l'obiettivo dell'analisi di rischio quantitativa ai sensi del D.Lgs 264/2006, attuazione della Direttiva CE n. 2004/54 in materia di sicurezza per le gallerie della Rete Stradale Transeuropea[1-2] .

L'ambiente confinato della galleria funge da modulatore della pericolosità dell'incendio e dei principali agenti del pericolo, in termini, ad esempio, di tossicità dei fumi. La rilevante presenza sul territorio nazionale di queste componenti infrastrutturali pone, quindi , il problema di garantire un adeguato livello di sicurezza per tutti gli utenti: "*La direttiva ha lo scopo di garantire un livello minimo di sicurezza agli utenti della strada nelle gallerie della rete stradale transeuropea mediante la prevenzione di situazioni critiche che possano mettere in pericolo la vita umana, l'ambiente e gli impianti della galleria nonchè mediante la protezione in caso di incidente*" (art. 1 - Direttiva 2004/54/CE)[1]. Posto che il rischio non è mai eliminabile in termini assoluti, la valutazione ha necessariamente carattere relativo e il livello di rischio ritenuto accettabile dipende dal contesto sociale, economico e tecnologico di un paese.

Il Decreto, che si configura di fatto come una norma progettuale e omnicomprensiva, impone una serie di Requisiti Minimi Obbligatori (RMO) classificati in: (1) Requisiti Strutturali, (2) Impiantistici, (3) Organizzativo-Gestionali. Questi sono identificati in funzione dei cosiddetti parametri progettuali di sicurezza, di cui i principali sono la lunghezza della galleria e il corrispondente volume di traffico. Per la progettazione specifica della sicurezza sono anche identificate una serie di condizioni anomale come la percentuale di mezzi pesanti, condizioni di accesso particolari nelle zone di accesso.

Il parametro (lunghezza della galleria) ha un legame funzionale con la probabilità di accadimento degli eventi e con il potenziale livello di esposizione massimo. Circostanze queste che ne determinano la sua decisiva importanza nell'Analisi di Rischio. Analogamente il parametro (volume di traffico) ha anch'esso un legame funzionale con l'affollamento e di conseguenza con il modello di esposizione. La Direttiva impone l'obbligo di un determinato numero e tipo di RMO in misura crescente all'aumentare del valore dei suddetti parametri. La stessa però non specifica in dettaglio le procedure per il loro dimensionamento né il livello di prestazione richiesto dai requisiti stessi (p. es. illuminazione, ventilazione, sorveglianza). Il Decreto recependo interamente lo spirito della Direttiva, indica la procedura e le soglie di accettabilità e tollerabilità del rischio, come criterio di verifica e validazione del progetto della sicurezza .

Nell'ottica del Decreto[2], l'Analisi di Rischio usata in modalità comparativa deve poter dimostrare che Requisiti Progettuali Alternativi possano garantire livelli di sicurezza equivalenti o maggiori di quelli obbligatori. Con il presente progetto di ricerca si vuole mettere in evidenza l'importanza della metodologia di analisi di rischio quale strumento di supporto per la scelta di soluzioni progettuali più adeguate al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza nelle gallerie stradali. La ricerca è focalizzata in particolar modo sulle caratteristiche di pericolosità delle pavimentazioni stradali. La scelta di materiali rappresenta infatti una componente fondamentale del progetto della sicurezza. I materiali stradali non sono solo componenti strutturali ma rappresentano elementi di eventuale pericolosità indotta – indiretta, che devono essere considerati in relazione ad altri fattori (quali merci pericolose, combustibile e materiali infiammabili costituenti le autovetture).

Attualmente sono due le principali tipologie di materiali utilizzati per le pavimentazioni stradali: conglomerato bituminoso e calcestruzzo. La prima, data la natura infiammabile legata alla presenza del legame bituminoso, ha il potenziale di incendiarsi con conseguente produzione di vapori, fumi e gas tossici. Di contro la soluzione in calcestruzzo presenta un comportamento al fuoco migliore: in caso d'incendio non emette fumi e mantiene buona parte delle sue caratteristiche meccaniche e non comporta generazione di calore e fumo aggiuntivi. L'adozione del calcestruzzo è resa obbligatoria in alcuni paesi dell'Unione Europea per gallerie di lunghezza superiore a 1 km. Inoltre, la colorazione chiara consente un miglioramento della visibilità, con evidenti benefici per la sicurezza della circolazione e mantenimento delle condizioni di illuminazione per l'emergenza [14-25].

Il progetto di ricerca qui proposto mira allo sviluppo di un'analisi comparativa multi-parametrica tra le due suddette tipologie di pavimentazione stradali, in cui l'analisi di rischio costituisce lo strumento quantitativo/oggettivo per individuare la preferibilità di una soluzione rispetto ad un'altra.

Il lavoro di ricerca è strutturato in tre fasi corrispondenti ai tre anni di Dottorato. La prima fase, con carattere formativo e di indirizzo, ha compreso la ricerca e l'approfondimento della letteratura tecnico - scientifica selezionata inerente le materie oggetto di interesse. Nel corso del secondo anno sono stati messi a punto gli strumenti concettuali e operativi ed è stata stabilita la strategia di ricerca. Sono stati riesaminati alla luce degli approfondimenti completati i contenuti originali della normativa vigente nonché gli effetti che le recente modifiche potrebbero comportare.

Infine, la terza e ultima fase consiste nell'applicazione degli strumenti messi a punto ai casi di studio così individuati: la galleria San Gottardo (Svizzera) e la galleria San Benedetto sulla SS685 dell'ANAS (Umbria). La scelta di questi casi di studio è stata dettata dalle seguenti motivazioni:

- Galleria San Gottardo (estensione di 16942 metri, singola canna e traffico bidirezionale) è stata scenario nel 2001 di un incidente di tipo collisione frontale con conseguente sviluppo di incendio che ha determinato il coinvolgimento e conseguente danneggiamento di lunghi tratti della volta e pavimentazione stradale (circa 200 metri).

- Galleria San Benedetto (canna unica con sviluppo pari a circa 4400 metri) è nota per i danni e deformazioni alla volta e pareti del rivestimento nonché alla pavimentazione come conseguenza dell'evento sismico del 30 ottobre del 2016. Questo esempio è particolarmente rilevante per le caratteristiche della galleria, che è priva di vie di esodo e illuminazione di emergenza con picchetti luminosi ravvicinati che conseguente limitata capacità di protezione degli utenti. Tale condizione è da considerare con attenzione data la funzione strategica del traforo per la gestione dei soccorsi territoriali.

Per fornire il necessario supporto di capacità di calcolo e simulazione al programma di ricerca sono stati individuati i seguenti software:

- I codici FDS e EVAC elaborato e reso gratuitamente disponibile dal National Institute of Standards and Technology (NIST), per la simulazioni termofluidodinamiche degli scenari incidentali e di esodo[26-27-28];
- Pathfinder rilasciato dalla Thunderhead Engineering che consente di approfondire le condizioni di esodo e di effettuare una cross-validazione dei risultati forniti da EVAC[29-20].
- Pyrosim (Thunderhead Engineering) programma di interfaccia grafica che consente di ricavare i file di input necessari per FDS e Pathfinder[31];

In particolare, il codice FDS è stato utilizzato per simulare le condizioni sperimentali di laboratorio relative alla determinazione della curve di rilascio termico (HRR) tramite il cono calorimetrico. Sono state realizzate delle simulazioni bidimensionali dell'esperimento del cono calorimetrico per miscele bituminose a partire dalle caratteristiche termo-fisiche rappresentative dei conglomerati bituminosi commerciali. Lo scopo delle suddette simulazioni è quello di ottenere una stima preliminare di curve di rilascio termico e di tossicità verosimili da utilizzare per una valutazione preliminare di scenari a scala reale in cui si dimostri che la partecipazione della pavimentazione all'emissioni possa effettivamente dare un contributo rilevante alla pericolosità.

Inoltre, si prevede l'applicazione delle tecniche di Machine Learning and Deep Learning per l'analisi dei dati di incidentalità, composizione e volume di traffico, dati di guasto e affidabilità dei sistemi di protezione per risolvere il modello di analisi di rischio e restituire i risultati comparativi in termini di indicatori quantitativi.

2 – Attività di ricerca realizzata nei primi due anni *(identificazione e documentazione delle attività di: raccolta dati, sviluppo modelli, calibrazione, validazione delle procedure, eventuali criteri di autoverifica, etc.).*

Il primo anno di dottorato è stato caratterizzato dallo svolgimento di una ricerca bibliografica selezionata volta a definire lo stato dell'arte sul ruolo delle caratteristiche dei materiali costituenti le gallerie in termini di "pericolosità, sicurezza e sostenibilità". Si è focalizzata l'attenzione sulle caratteristiche delle pavimentazioni ed in particolare sui conglomerati bituminosi nella prospettiva di un confronto, quantitativo-prestazionale basato sul rischio, con soluzioni alternative come il calcestruzzo. Una sintesi delle pubblicazioni selezionate poiché ritenute maggiormente significative è riportata nell'Allegato I. Come stabilito dal programma di Dottorato, sono stati frequentati seminari comuni al gruppo di Dottorato tenuti dal Collegio dei Docenti e sono stati organizzati

incontri individuali con i tutor della tesi per definire la linea di ricerca da seguire e le attività di formazione da svolgere.

Il percorso formativo svolto e da svolgere, ha carattere multidisciplinare, e presenta tutti gli argomenti necessari per lo svolgimento dell'attività di ricerca. Nel secondo anno sono stati messi a fuoco gli strumenti concettuali e operativi. In particolare, grazie alla partecipazione e collaborazione con attività di tutoraggio per le tesi di Laurea ai corsi curriculari, Safety and Risk Analysis e Risk Management and Safety Engineering, è stata approfondita e rafforzata la preparazione su argomenti come l'Analisi di Rischio e Criteri di Accettabilità, che rivestono un ruolo fondamentale nel proseguo del seguente progetto di ricerca. È stata svolta un'analisi critica del quadro normativo vigente, costituito dalla Direttiva 2004/54/CE e il Decreto Legislativo di recepimento n. 264 del 5 ottobre del 2006 relativa ai requisiti minimi delle gallerie stradali. L'analisi e l'approfondimento del quadro normativo si è reso necessario anche in virtù delle modifiche apportate agli Allegati del D.Lgs 264/2006 con il Decreto del Ministero delle Infrastrutture e delle mobilità sostenibili del 12 Luglio 2021.
Da gennaio 2021 ho preso parte al Corso di Formazione Sapienza per i Responsabile della Sicurezza delle Galleria Stradali (RSG) di Autostrade per l'Italia, prima come uditore e successivamente con interventi di docenza e tutoraggio sui temi:

- Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso.
- Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

Si allega un estratto del materiale di docenza corrispondente al risultato degli approfondimenti svolti durante il primo anno di dottorato. Durante quest'esperienza e nei forum di discussione con i partecipanti Ingegneri di Autostrade per l'Italia con il ruolo di RSG, sono stati messi a fuoco i concetti e temi applicativi che fanno parte del percorso del terzo anno di Dottorato.

Parallelamente alle suddette attività di approfondimento, è stato portato avanti autonomamente lo studio dei software di simulazione termofluidodinamica e di esodo, tra cui il più sofisticato e utilizzato Fire Dynamics Simulator (FDS), elaborato dal National Institute of Standards and Technology (NIST), Pathfinder, nonché software di interfaccia grafica (Pyrosim).

3 – Esame delle problematiche emerse e degli aspetti critici *(breve discussione degli elementi caratterizzanti il lavoro compiuto, con particolare attenzione agli aspetti più critici ed alle difficoltà emerse, con indicazione delle soluzioni individuate o delle alternative praticabili per la prosecuzione delle attività).*

L'analisi della bibliografia[14-25] ha fatto emergere la necessità di sviluppare strumenti adeguati e validati per condurre correttamente il processo di progettazione comparativa di preferibilità tra soluzioni progettuali alternative e valutazione costi benefici vincolato dai criteri di accettabilità e tollerabilità del rischio. È degno di nota che la tipologia di pavimentazione stradale e quindi la natura dei materiali strutturali sono scelte del "gestore" dell'infrastruttura e che in alcuni paesi (come, ad esempio, l'Austria e Spagna) l'uso della pavimentazione in conglomerato bituminoso è consentito solo in gallerie di lunghezza inferiore a 1000 metri o non raccomandato per lunghezze superiori. Ogni tipo di scelta deve essere verificata non solo dal punto di vista economico ma anche dal punto di vista dei criteri di accettabilità del rischio imposti dalla norma. È quindi imperativo disporre di strumenti come la progettazione *Risk Based Design* (RBD).

4 – Potenzialità di conseguire un "impatto" scientifico significativo *(giudizio critico sulla efficacia ed originalità che la ricerca, al termine del Dottorato, potrà dispiegare, in relazione al quadro scientifico di riferimento e all'evoluzione delle conoscenze in corso in ambito nazionale ed internazionale).*

Come è emerso dagli approfondimenti sulla bibliografia selezionata la procedura dell'analisi di rischio rappresenta uno strumento efficace necessario per confrontare e indirizzare la scelta di preferibilità tra soluzioni progettuali alternative. Nel caso specifico di nostro interesse si tratta di una scelta tra i materiali costituenti le pavimentazioni stradali con l'obiettivo "obbligato" dalla direttiva di dover garantire un adeguato livello di sicurezza nelle gallerie stradali. È necessario perché prioritariamente imposto dal criterio di accettabilità incondizionata o in subordine di accettabilità condizionata ALARP. È efficace perché qualora l'insieme di scenari probabilizzati scelti per la progettazione offrano una soluzione accettabile, quest'ultima può essere posta a confronto con alternative eventualmente preferibili in modo efficace. Quindi le soluzioni progettuali che superano i criteri di accettabilità possono essere confrontati tra di loro e scelte in base ad uno specifico criterio di convenienza. In definitiva quindi, si osserva che nel caso delle gallerie stradali il decreto nella sua caratteristica di norma progettuale impone che la scelta sia basata sul criterio di accettabilità del rischio insieme in subordine ad altri criteri di tipo economico, tecnico e di sostenibilità.

Considerando il quadro scientifico di riferimento, gli strumenti attualmente disponibili e correntemente usati per un confronto comparativo progettuale che sia rigoroso e rappresentativo, non risultano sufficientemente verificati e validati. Nel presente progetto sono state sviluppate idee e procedure per l'identificazione precoce (per via simulativa) delle condizioni limite affinché si abbia un impatto rilevante di pericolosità aggiuntiva dovuta per esempio alla scelta di un determinato tipo di pavimentazione. Un tale risultato preliminare, ottenuto in condizioni standard, sicuramente è da considerare un contributo efficace ed originale, perché in grado di suggerire e giustificare la decisione di procedere ad una verifica più costosa di maggior dettaglio, eventualmente con sperimentazioni in laboratorio o test pilota a scala reale (vedi progetto Pavirex nella galleria delle Asturias[19]).

5 – Schema di impostazione della Tesi finale di Dottorato e programmazione delle attività di completamento.

Indice (Table of Contents)

Abstract ……...
List of pubblication ……
Nomenclature …….

Capitolo I – Introduzione (*Chapter I – Introduction*) …….
1.1 Scopo della ricerca (*1.1 The aim of research*) ……...
1.2 Contesto: pavimentazioni in conglomerato bituminoso e calcestruzzo (*1.2 Background: Asphalt vs concrete road pavement*) ……..
1.3 Criteri per il confronto e preferibilità economica, tecnologica, sicurezza e sostenibilità (1.*3 Criteria for comparison and economic, technological, safety and sustainability preferability*) …….
1.4 Significatività della Ricerca (*1.4 Significance of Research*) ……
1.5 Struttura della Tesi (*1.5 Structure of Thesis*)…….....

Rif. Bibliografici (*References*)…….....

Capitolo II – Eurocodici, Direttive e Decreti: Italia paese delle gallerie e dell'ALARP (*Chapter II - Eurocodes, Directives and Decrees: Italy, Tunnels and ALARP country*) …...…….

2.1 Requisiti progettuali minimi obbligatori imposti dalla Direttiva Europea per la sicurezza delle gallerie stradali (*2.1 Minimum design requirements imposed by the European Directive for the safety of road tunnels*)
2.1.1 Requisiti strutturali e caratteristiche di resistenza al fuoco dei materiali (*2.1.1 Structural requirements and fire resistance characteristics of materials* ……..
2.1.2 Requisiti di reazione al fuoco dei materiali costruttivi (*2.1.2 Fire reaction requirements of construction materials*) …….
2.2 Criteri di Accettabilità del rischio per le gallerie stradali (*2.2 Risk acceptability criteria for road tunnels).*
2.3 Confronto Criteri di accettabilità per le gallerie stradali e ferroviarie (*2.3 Comparison Acceptability criteria for road and railway tunnels)*……..

Rif. Bibliografici (*References*)……

Capitolo III – Rischio come fattore di progettazione: Risk Based Design (RBD) (*Chapter III – Risk as design factor: Risk Based Design (RBD)*)……
3.1 Risk Based Design per confronto progettuale tra soluzione alternative pavimentazione in conglomerato bituminoso e calcestruzzo (*3.1 Risk Based Design for design comparison between alternative solutions for asphalt and concrete pavement*)……..
3.2 Modello Gu@larp (*3.2 Gu@larp model*) ……

Rif. Bibliografici (*References*)……..

Capitolo IV – Simulazione scenari (a scala di laboratorio e a piena scala) tramite modellazione termofluidodinamica e di esodo (*Chapter IV - Scenario simulation (at laboratory scale and at full scale) through thermofluidodynamic and exodus modeling*) ……..
4.1 Esame della letteratura tecnico scientifica per la definizione della curva di rilascio termico di conglomerati bituminosi: cono calorimetrico (*4.1 Examination of the technical scientific literature for the definition of HRR curve of asphalt mixtures: cone calorimeter*)…….
4.2 Modellazione degli esperimenti in laboratorio e passaggio scala reale (*4.2 Modeling of experiments in the laboratory and full scale transition*)…….
4.3 Simulazione scala reale di incendi in galleria e scenari di esodo (*4.3 Full scale simulation of tunnel fires and escape scenarios*)……..
4.3 Sperimentazione scala reale: Progetto Pavirex Galleria Asturias (4.4 *Full scale experimentation: Pavirex Galleria Asturias project*)……

Rif. Bibliografico (*References*)…….

Capitolo V – Criteri di Verifica e Validazione di modelli e procedure di calcolo (*Chapter V- Criteria for Verification and Validation of models and calculation procedures*) ……..
5.1 Norme ISO e raccomandazioni NIST (*5.1 ISO standards and NIST recommendations)* ……
5.2 Esempi di applicazioni di procedure di verifica e validazione nella letteratura tecnico-scientifica (*5.2 Application Examples of verification and validation procedures in the technical-scientific literature)*…….

Rif. Bibliografici (*References*)……..

Capitolo VI – Casi di Studio (*Chapter VI – Case studies*) ……
6.1 Simulazioni delle sperimentazioni a scala di laboratorio (*6.1 Simulations of laboratory-scale experiments*
6.2 Approfondimento scenario San Gottardo (*6.2 Approfondimento scenario San Gottardo*)……..
6.3 Valutazione rischio multiplo: Galleria San Benedetto **(** *6.3 Multiple risk assessment: San Benedetto Tunnel)*…….
6.4 Gottardo vs San Benedetto (*6.4 Gottardo vs San Benedetto Tunnel*)……

Rif. Bibliografici (*References*) …….

Capitolo VII – Conclusioni e raccomandazioni future (*Chapter VII – Conclusion and future research*) …….

Appendice (*Appendix*) …….
Lista Figure (*List of Figures*) ……..
Lista di Grafici (*List of Graph*s) ……..
Lista di Tabelle (*List of Tables*) ……..

6 – Cronoprogramma *(seguire lo schema seguente)*

n.	Attività	II Anno (consuntivo)				III Anno			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
1.	Partecipazione corsi specifici di formazione e seminari per approfondimento tematiche inerenti l'Analisi di Rischio e Criteri di Accettabilità.								
2.	Analisi e approfondimento critico del quadro normativo vigente sulla sicurezza delle gallerie stradali e ferroviarie.								
3.	Studio e approfondimento sull'utilizzo di strumenti software di modellazione termo- fluidodinamica e di esodo (FDS-EVAC).								
4.	Tutoraggio tesi di Laurea e supporto attività didattica: applicazione del software di modellazione termo-fluidodinamica e di esodo per sistema stradale e ferroviario;								
5.	Tutoraggio nel Corso di Formazione Certificata per Responsabili della Sicurezza in Galleria ai sensi del Decreto Legislativo del 5 ottobre 2006, n° 264.								
6.	Approfondimento sulle modifiche intervenute al Decreto Legislativo del 5 ottobre 2006, n° 264., relativi alle documentazioni inerenti le deroghe ai requisiti minimi di sicurezza.								
7.	Applicazione del codice FDS per simulazione di curve di rilascio termico (HRR) ottenute tramite il cono calorimetrico in condizioni sperimentali di laboratorio.								
8.	Applicazione delle tecniche di Machine Learning and Deep Learning per l'analisi dei dati di incidentalità, composizione e volume di traffico, dati di guasto e affidabilità dei sistemi di sicurezza.								
9.	Applicazione di strumenti concettuali e operativi ai casi di studio individuati: Galleria San Gottardo e San Benedetto.								
10	Stesura tesi di Dottorato e divulgazione dei risultati mediante pubblicazioni scientifiche.								

SEZIONE B

Attività di collaborazione e supporto; formazione ed acquisizione di capacità evolute

(massimo 2 pagine)

1 – Partecipazione alle attività di didattica presso la struttura di afferenza *(attività seminariale, supporto alla didattica frontale, preparazione di materiale didattico, collaborazione per ricevimento studenti, collaborazione allo svolgimento di tesi di laurea e stages).*

- Partecipazione e supporto attività didattica nel corso Safety and Risk Analysis e Risk Management and Safety Engineering, tenuti dal Prof. Ing. Massimo Guarascio.

-Supporto attività didattica nei corsi di perfezionamento in sicurezza sul lavoro: Corso di Specializzazione per Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione (RSPP) ai sensi dell'art. 32 del D.Lgs 81/08 e s.m.i (24 ore); Corso per Coordinatori della Sicurezza in fase di Progettazione e di Esecuzione ai sensi dell'art.98 del D.Lgs 81/08 e s.m.i. (120 ore).

-Tutor di Tesi di Laurea Magistrale nel Corso di Laurea in Ingegneria della Sicurezza e Protezione Civile dal titolo: Mobility network maintenance and monitoring policy in CBA framework considering the risk factor in ALARP logic / Verifica progettuale ALARP per le gallerie ferroviarie: calcolo degli indicatori di rischio per le Gallerie Santa Croce e Balduini sulla tratta Orte-Foligno (Relatrice: Prof.ssa Ing. Mara Lombardi, Correlatore: Prof. Ing. Massimo Guarascio).

-Lezione Corso di Formazione Certificata per Responsabili della Sicurezza in galleria ai sensi del Decreto Legislativo 5 ottobre 2006 , n° 264 erogato dalla Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale – Università di Roma Sapienza, dal titolo: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

- Partecipazione al Bando di concorso mediante valutazione comparativa per il conferimento di n. 12 borse di tutorato per l' a.a. 2020/2021: attività di promozione della cultura della sicurezza.

2 – Attività di formazione *(soggiorni presso strutture di didattica e ricerca in Italia e all'estero, corsi curriculari o speciali frequentati, partecipazione a seminari, convegni, workshop, etc.).*

-Webinar **Principi di Utilizzo di IRIS**, Area Supporto alla Ricerca e Trasferimento Tecnologico, Settore Catalogo prodotti della Ricerca e Valutazione, Sapienza Università di Roma (RM) – 9 dicembre 2020.

-Seminario **Nuove Tecnologie per le pavimentazioni stradali**, organizzato da Strade Italiane e Bitumi (SITEB), in collaborazione con ITALBITUMI e WIRTGEN GROUP – 22, 24 e 26 marzo 2021.

-Webinar **Vaccini Anti-Covid19 e Rapporto di Lavoro, Libertà, Responsabilità e Obbligo**, organizzato nell'ambito del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria della Sicurezza e Protezione Civile (LM-26) , Sapienza Università di Roma (RM) – 20 maggio 2021.

-Corso di Formazione Certificata per Responsabili della Sicurezza in Galleria ai sensi del Decreto Legislativo del 5 ottobre 2006, n° 264 erogato dalla Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale.

- Seminario **Risk and Territorial Resilience**, Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Perugia (PG). Relatori: Prof.ssa Mara Lombardi e Prof. Massimo Guarascio. 9 giugno 2021.

-Seminario **Analisi di Rischio**, Dottorato Infrastrutture e Trasporti, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA), Università degli studi di Roma (RM) -13 Luglio 2021.

- 9th International Conference on **Safety and Security Engineering** (SAFE – 2021), 9 - 11 Novembre 2021 (da completare).

- Seminario **Scientific calculation tools and Big Data: Machine Learning** Corsi Civis Sapienza – Formazione sulle soft skills per Dottorandi – 1° dicembre 2021 (da completare);

3 – Collaborazione a studi, ricerche, programmi strutturati *(contributi in PRIN, ricerche di Facoltà e di Ateneo, convenzioni, etc., con inquadramento del programma e specificazione dell'attività prestata).*

SEZIONE C

Informazioni

(Tale sezione contiene le informazioni richieste alla fine ogni anno dall'Ufficio Dottorati)

1) Titolare di borsa erogata dalla Sapienza - Università di Roma…….SI☒ NO☐

2) Nazionalità …Italiana……..

3) Dottorato in cotutela …….……SI☐ NO ☐

(se si indicare il cotutore……..)

4) Dottorato con doppio titolo …….…….……SI☐ NO☒

5) Borsa con finanziamento esterno …….……SI☐ NO☒

6) Università di provenienza …Università degli studi di Roma Sapienza…….

7) Numero di mensilità di ricerca spese in una struttura di ricerca estera ……

8) Finanziamenti all'interno di reti internazionali di formazione alla ricerca ..SI☐ NO☒

9) Pubblicazioni e altri prodotti degli ultimi 3 anni

***Per le aree bibliometriche**. Articoli pubblicati su riviste peer-reviewed internazionali (ed eventualmente proceedings per le aree che accettano) con impact factor (indicizzate WoS) o indicizzate Scopus.*

Mara Lombardi, E. Di Benedetto, D Berardi. Fire behaviour of asphalt mixtures for road tunnel application: a review. Materials (under review)

***Per le aree non bibliometriche**. Prodotti editoriali pubblicati dai dottorandi come Monografie dotate di ISBN e/o pubblicazioni in riviste di fascia A (o prodotti editoriali equivalenti ammessi dalla VQR).*

ALLEGATO I
-Riferimenti Bibliografici*-

*Sono riportati raggruppati per aree tematiche i testi di riferimento selezionati e ampiamente utilizzati per gli approfondimenti del secondo anno che includono alcuni dei testi consultati durante il primo anno che riguardano la caratterizzazione dell'asfalto e che sono stati ulteriormente approfonditi.

Normativi

1. Direttiva 2004/54/CE del Parlamento e del Consiglio Europeo, 29 Aprile 2004, relativa ai "Requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della Rete Stradale Transeuropea"

2. Decreto Legislativo n°264, 5.11. 2006 - "Attuazione della Direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea"

3. Decreto del Ministero delle Infrastrutture e della mobilità sostenibili 12 Luglio 2021, Aggiornamento e adeguamento degli allegati al Decreto Legislativo 5 ottobre 2006, n. 264.

4. Decreto Ministeriale 3 agosto 2015 "Approvazione di norme tecniche per la prevenzione incendi, ai sensi dell'art. 15 del Decreto Legislativo 8 marzo 2006 n.139".

5. Linea Giuda ANAS per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie stradali secondo la normativa vigente (Seconda Edizione -2009).

6. Decreto del Presidente della Repubblica 1° agosto 2011 , n. 151 . Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi.

7. ISO 16730-1 Fire safety engineering — Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods (First edition 2015).

8. Enrico Ronchi, Daniel Nilsson, The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models, NIST Technical Note 1822 (November 2013).

Analisi di Rischio

9. M. Guarascio, M. Lombardi, G. Rossi, G. Sciarra. Risk Analysis and acceptability criteria, Safety Engineering “Sapienza” – Rome University.

10. M. Guarascio, M. Lombardi, G. Rossi, G. Sciarra. Road tunnels safety rules in Italy: the tunnel country, Safety Engineering “Sapienza” – Rome University.

11. M. Guarascio, M. Lombardi, G. Rossi, G. Sciarra. Risk analysis and reliability-based design in tunnel fire safety country, Safety Engineering “Sapienza” – Rome University.

12. Kim Genberg & Karin Sandin, The verification and validation of a probabilistic risk analysis method for road tunnels, Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, LUND UNIVERSITY (2020).

13. Sandin, Karin, Grenberg, Kim, Verification and Validation of the ARTU (Tunnel Fire Risk Analysis) tool, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden Lund (2019).

14.Holický, M. – “Risk criteria for road tunnels”, Special Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication (2007) Stanford University.

15.M. Molag, I.J.M. Trijssenaar-Buhre – “Risk assessment guidelines for tunnels”, Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements.

16.Trbojevic, V.M. – “Risk criteria in EU”, Risk Support Limited, London, U.K.

17. Weger, D. – “Scenario Analysis For Road Tunnels”

Caratterizzazione della pericolosità dell’asfalto

18. W. De Lathawer, Effects of pavement on fires in road tunnels, Routes/Roads 334 (2007) 54–61

19. E. Toraldo, Comparative laboratory investigation into pavement materials for road tunnels, Road Mater. Pave. Design 14 (2) (2013) 310–324.

20. E. Puente, D. Lazar, D. Alvear, Study of tunnel pavements behaviour in fire by using coupled cone calorimeter-FTIR analysis, Fire Saf. J. 81 (2016) 1–7.

21. Noumowe A. (2004) Asphalt Ignition in case of Fire in Civil-Engineering Structures: chemical analysis. 10th International Fire Science & Engineering Conference. July 2004, Edinburgh, Scotland.

22. Noumowe A. (2004) Combustion of Asphalt and Concrete in case of Fire in Roads. 9th International Symposium on Concrete Roads. April 2004, Istanbul, Türkiye. 3) A. Bonati, S. Rainieri, G. Bochicchio, et al., Characterization of thermal properties and combustion behaviour of asphalt mixtures in the cone calorimeter, Fire Saf. J. 74 (2015) 25–31.

23. H.Q. Shi, T. Xu, R.L. Jiang, Combustion mechanism of four components separated from asphalt binder, Fuel 192 (2017) 18–26.

24. T. Xu, X.M. Huang, Study on combustion mechanism of asphalt binder by using TG-FTIR technique, Fuel 89 (9) (2010) 2185–2190.

25. H.Q. Shi, T. Xu, R.L. Jiang, Combustion mechanism of four components separated from asphalt binder, Fuel 192 (2017) 18–26.

26. SHORT COMMUNICATION Fire risks of burning asphalt B. Schartel, H. Bahr, U. Braun and C. Recknagel BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Germany, FIRE AND MATERIALS Fire Mater. 2010; 34:333–340 Published online 3 June 2010 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).

27. A. Bonati, S. Rainieri, G. Bochicchio, et al., Characterization of thermal properties and combustion behaviour of asphalt mixtures in the cone calorimeter, Fire Saf. J. 74 (2015) 25–31.

30. A. Bonati, G. Bochicchio, F. Merusi, G. Polacco, F. Giuliani, Fire behaviour and heat release properties of asphalt mixtures, J. Pavement Res.Technol.6 (2) (2013)100–108.

31. Romuald AVENEL, François DEMOUGE, Philippe FROMY, Fire behaviour study of asphalt road pavement in tunnel, Fire and Materials 2007, Interscience ltd, San Francisco, January 29-31, 2007

32. A. Hassn, M. Aboufoul, Y. Wu, et al., Effect of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures, Constr. Build. Mater. 115 (2016) 327–335.

33. R.B. Mallick, B.L. Chen, Sankha Bhowmik, Harvesting energy from asphalt pavements and reducing the heat island effect, Int. J. Sustainable Eng. 2 (3) (2009) 214–228.

34. Ignacio Pérez1, Marisol Barral, Ramón Romera, Fernando Garrido, Celestino González, Inmaculada Álvarez, María Eugenia Muñoz, e, Antxón Santamaría, Zita Palmillas, Sara Villanueva. Asphalt mixture fire performance at full scale. PAVIREX project - 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress | 1-3 June 2016 | Prague, Czech Republic.

35. Qiu, Tao Yang, Xiuling Wanga, Lixin Wang Guanglong Zhang. Review of the flame retardancy on highway tunnel asphalt pavement Junling. Construction and Building Materials 195 (2019) 468–482

36. Review of the flame retardancy on highway tunnel asphalt pavement Junling Qiu, Tao Yang, Xiuling Wanga, Lixin Wang Guanglong Zhang Construction and Building Materials 195 (2019) 468–482

37. A. Bonati, F. Merusi, G. Polacco, S. Filippi, F. Giuliani, Ignitability and thermal stability of asphalt binders and mastics for flexible pavements in highway tunnels, Constr.Build. Mater. 37(2012)660–668.

38. A. Bonati, F. Merusi, G. Bochicchio, B. Tessadri, G. Polacco, S. Filippi, F. Giuliani, Effect of nanoclay conventional flame retardants on asphalt mixtures fire reaction, Constr.Build. Mater.47(2013)990–100023.

39. Feipeng Xiao, Rui Guo, Jingang Wang, Flame retardant and its influence on the performance of asphalt – A review. Construction and Building Materials 212 (2019) 841–861.

40. T. Xu, X.M. Huang, Y.L. Zhao, Investigation into the properties of asphalt mixtures containing magnesium hydroxide flame retardant, Fire Saf. J. 46 (6) (2011) 330–334.

41. P. Cong, J. Yu, S. Wu, X. Luo, Laboratory investigation of the properties of asphalt and its mixtures modified with flame retardant, Constr.Build. Mater.22 (6) (2008) 1037–1042.

42. S. Wu, P. L. Cong, J. Yu, X. Luo, L. Mo, Experimental investigation of related properties of asphalt binders containing various flame retardants, Fuel 85(9) (2006)1298–1304.

43. J. Yu, P. Cong, S. W u, Investigation of the properties of asphalt and its mixtures containing flame retardant modifier, Constr.Build. Mater. 23(2009) 2277–2282.

44. Morgan J. Hurley, SFPE Handbook of fire protection engineering, fifth edition.

45. Colwell, S. (2006). Test Methodologies for Reaction to Fire of Pavement Materials. Document SAM-04-D20, Proceeding SAMARIS Research Project, 16-17 February 2006, Lausanne, Switzerland.

50. Domenichini L., La Torre, F. e Caputo, F. J. - “Pavimentazione nelle gallerie stradali “– Strade e Autostrade 2-2007;

51. Paola di Mascio, Laura Moretti – “Comparazione tecnica ed economica di pavimentazioni cementizie e bituminose in galleria” (Marzo 2017), Federbeton CONFINDUSTRIA.

52. Laura Moretti, Giuseppe Cantisani, Paola Di Mascio, Silvia Caro, Technical and economic evaluation of lighting and pavement in Italian road tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology 65 (2017) 42–52.

Software Fluidodinamica Computazionale

60. Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Jason Floyd, Randall McDermott, Fire Dynamics Simulator User’s Guide (Versione 6) NIST Special Publication 1019 Sixth Edition.

61. McGrattan, Kevin, et al. 2013. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model. Gaithersburg, Maryland, USA: s.n. November 2013. NIST Special Publication 1018.

62. Kevin McGrattan Simo Hostikka Randall McDermott Jason Floyd Craig Weinschenk Kristopher Overholt. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation.

NIST Special Pubblication 1018-3 Sixth Edition.

63. Thunderhead Engineering, Pathfinder Technical References, 2021.

65. Thunderhead Engineering, Pathfinder User Manual, 2021.

66.Thunderhead Engineering, Pyrosym User Manual, 2021.

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

CORSO DI FORMAZIONE PER RESPONSABILI DELLA SICUREZZA IN GALLERIA

Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

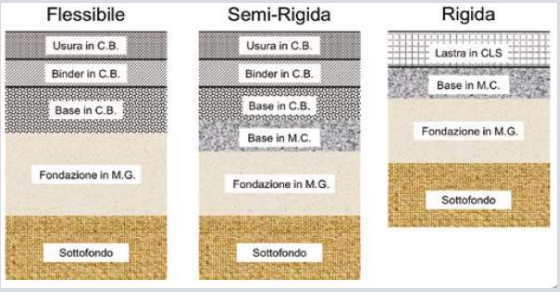
E. Di Benedetto – M. Guarascio – M. Lombardi – D. Berardi – N. Sciaretta

17 FEBBRAIO 2021

1

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.



2

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

Caratteristiche *strutturali*:
- elevata capacità portante;
- buona stabilità;

Caratteristiche *funzionali:*
- Comfort e sicurezza;
- Regolarità del piano viabile;
- Buona aderenza piano/pneumatico;
- Bassa permeabilità all'acqua;
- Ridotto rumore;

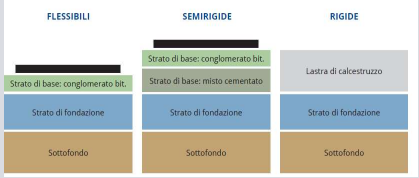
3

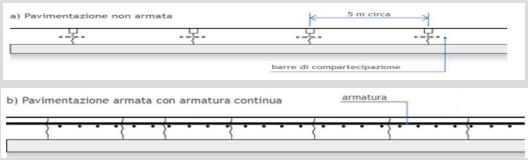
SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

Tre tipologie di pavimentazioni stradali:

- Flessibili;
- Semirigide;
- Rigide;



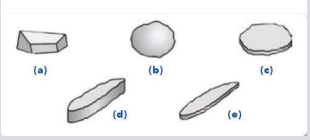


4

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

- Aggregati lapidei
- Filler
- Bitume



5

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

Tabella 2-1:composizione elementare del petrolio

Elemento	% in peso
Carbonio	81-87
Idrogeno	10-14
Zolfo	0.06-8
Ossigeno	0-2
Azoto	0.02-1.7

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$CO + 0.5\ O_2 \rightarrow CO_2$$

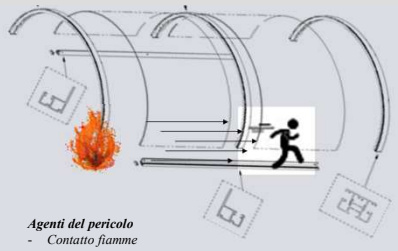
$$H_2 + 0.5\ O_2 \rightarrow H_2O$$

$$S + O_2 \leftrightarrow SO_2$$

6

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.



Agenti del pericolo
- *Contatto fiamme*
- *Contatto gas caldi*
- *Irraggiamento*
- *Inalazione gas di combustione*
- *Livello di visibilità*

ASET – RSET > 0
Esodo in Sicurezza

7

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

D. Lgs. 264/2006: "Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea"

Art. 1
(Oggetto e campo di applicazione)

1. Il presente decreto ha lo scopo di garantire un livello minimo sufficiente di sicurezza agli utenti della strada nelle gallerie della rete stradale transeuropea mediante la progettazione e l'adozione di **misure di prevenzione** atte alla riduzione di situazioni critiche che possano mettere in pericolo la vita umana, l'ambiente e gli impianti della galleria, nonché mediante **misure di protezione** in caso di incidente.

Art. 3
(Misure di sicurezza)

1. I Gestori delle gallerie provvedono affinché le gallerie di loro competenza, rientranti nel campo di applicazione del presente decreto, **soddisfino i requisiti minimi** di sicurezza di cui all'allegato 2.

8

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

D. Lgs. 264/2006, ALLEGATO 2

MISURE DI SICUREZZA

1. Criteri per decidere sulle misure di sicurezza

1.1. Parametri di sicurezza

1.1.1. Le **misure di sicurezza** da realizzare in una galleria devono basarsi su una considerazione sistematica di tutti gli aspetti del sistema consistenti nell'infrastruttura, l'esercizio, gli utenti e i veicoli.

1.1.2. Si tiene conto dei seguenti parametri quali:
- **lunghezza della galleria,**
- **numero di fornici,**
- **numero di corsie,**
- **geometria della sezione trasversale,**
- allineamento verticale e orizzontale,
- tipo di costruzione,
- traffico unidirezionale o bidirezionale,
- **volume di traffico per fornice (compresa la distribuzione nel tempo),**
- rischio di congestione (giornaliero o stagionale),
- tempo di intervento dei servizi di pronto intervento,
- **presenza e percentuale di veicoli pesanti,**
- presenza, percentuale e tipo di trasporto di merci pericolose,
- caratteristiche delle strade di accesso,
- larghezza delle corsie;

9

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

Livello di protezione [4]
(Gallerie V)

❖ **Protezione attiva**

- Illuminazione / segnaletica luminosa
- Ventilazione semi-trasversale,
- Centro di controllo
- Semafori ogni 1000 m

❖ **Protezione passiva**

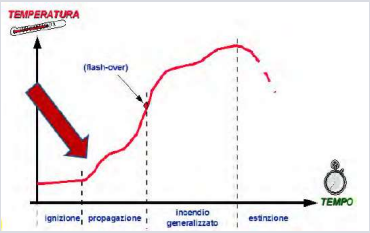
-banchine
-drenaggio
-resistenza al fuoco
-via di esodo ogni 500 m

10

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

- **Reazione al fuoco**: Grado di **partecipazione all'incendio** di materiali combustibili.



- Limitare la velocità di propagazione dell'incendio;
- Aumentare il tempo di evacuazione;

11

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

Requisiti

Misura del livello di Protezione / Misura del livello di Sicurezza

Margine di Sicurezza = [ASET-RSET]>0

ASET: Available Safe Egress Time (Tempo Limite di Esodo)
RSET: Required Safe Egress Time (Tempo impiegato dagli "esodanti")

12

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

CLASSE DI REAZIONE AL FUOCO ITALIANA

D.M. 26 giugno 1984 modificato dal **D.M. 3 settembre 2001**: è relativo alla classificazione di reazione al fuoco e omologazione dei mate-riali ai fini della prevenzione incendi

Ai materiali sono assegnate le seguenti **classi all'aumentare della loro partecipazione alla combustione**:

Materiali: Classe **0** *(incombustibili)*, **1**, **2**, **3**, **4**, **5**
Mobili imbottiti: Classe **1 IM**, **2 IM**, **3 IM**

13

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

CLASSE DI REAZIONE AL FUOCO EUROPEA

UNI EN 13501-1:2009: fornisce la procedura di classificazione di reazione al fuoco di tutti i prodotti da costruzione, inclusi i prodotti incorporati negli elementi da costruzione.

I **materiali** sono classificati secondo le euroclassi:
A1, **A2** *(incombustibili)*, **B**, **C**, **D**, **E**, **F**

Inoltre, i prodotti vengono classificati in 3 gruppi:
•Prodotti da costruzione esclusi pavimenti, materiali di forma lineari destinati all'isolamento delle condutture;
•Pavimenti;
•Materiali di forma lineare destinati all'isolamento termico delle condutture;

14

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

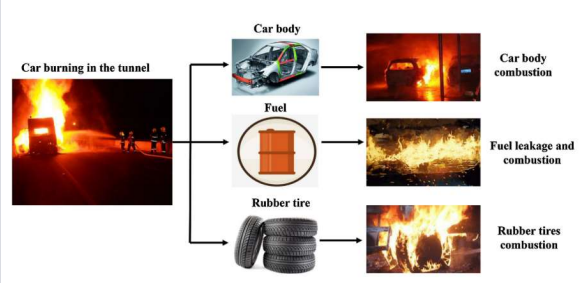
Classe	Metodo/i di prova	Criteri di classificazione	Classificazione aggiuntiva
$A1_{fl}$	prEN ISO 1182[1)] e	$\Delta T \leq 30$ °C; e $\Delta m \leq 50\%$; e $t = 0$ (cioè fiamma non persistente)	-
	prEN ISO 1716	$PCS \leq 2{,}0$ MJ/kg[1)] e $PCS \leq 2{,}0$ MJ/kg[2)] e $PCS \leq 1{,}4$ MJ/m²[3)] e $PCS \leq 2{,}0$ MJ/kg[4)]	-
$A2_{fl}$	prEN ISO 1182[1)] o	$\Delta T \leq 50$ °C; e $\Delta m \leq 50\%$; e $t \leq 20$ s	-
	prEN ISO 1716 e	$PCS \leq 3{,}0$ MJ/kg[1)] e $PCS \leq 4{,}0$ MJ/m²[2)] e $PCS \leq 4{,}0$ MJ/m²[3)] e $PCS \leq 3{,}0$ MJ/kg[4)]	-
	prEN ISO 9239-1[5)]	Flusso critico[6)] $\geq 8{,}0$ kW/m²	Produzione di fumi[7)]
B_{fl}	prEN ISO 9239-1[5)] e	Flusso critico[6)] $\geq 8{,}0$ kW/m²	Produzione di fumi[7)]
	prEN ISO 11925-2[8)]; Esposizione = 15 s	$Fs \leq 150$ mm entro 20 s	-
Classe	**Metodo/i di prova**	**Criteri di classificazione**	**Classificazione aggiuntiva**
C_{fl}	prEN ISO 9239-1[5)] e	Flusso critico[6)] $\geq 4{,}5$ kW/m²	Produzione di fumi[7)]
	prEN ISO 11925-2[8)]; Esposizione = 15 s	$Fs \leq 150$ mm entro 20 s	-
D_{fl}	prEN ISO 9239-1[5)] e	Flusso critico[6)] $\geq 3{,}0$ kW/m²	Produzione di fumi[7)]
	prEN ISO 11925-2[8)]; Esposizione = 15 s	$Fs \leq 150$ mm entro 20 s	-
E_{fl}	prEN ISO 11925-2[8)]; Esposizione = 15 s	$Fs \leq 150$ mm entro 20 s	-
F_{fl}	Reazione non determinata		

1) Per i prodotti omogenei e i componenti sostanziali di prodotti non omogenei.
2) Per qualsiasi componente esterno non sostanziale di prodotti non omogenei.
3) Per qualsiasi componente interno non sostanziale di prodotti non omogenei.
4) Per il prodotto nel suo insieme.
5) Durata della prova = 30 min.
6) Per flusso critico si intende il flusso radiante che determina lo spegnimento della fiamma o il flusso radiante dopo una prova di 30 minuti, a seconda di quale sia il valore più basso (cioè il flusso corrispondente all'estensione massima di propagazione del fuoco).
7) e1 = Fumi ≤ 750% minuti;
e2 = non a1.
8) Quando la fiamma investono la superficie e, a seconda delle condizioni finali di applicazione del prodotto, la parte laterale.

15

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.



J. Qiu, T. Yang, X. Wang, L. Wang, and G. Zhang, "Review of the flame retardancy on highway tunnel asphalt pavement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 195, pp. 468–482, 2019;

16

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

San Gottardo: 24 ottobre 2001

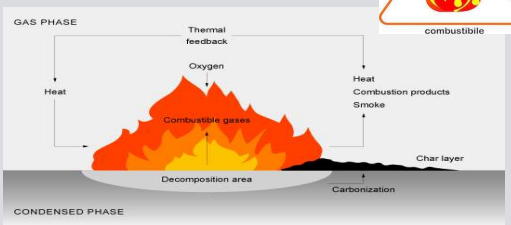
https://www.rsi.ch/news/oltre-la-news/L%E2%80%99inferno-15-anni-fa-8199202.html

17

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

- Combustibile;
- Comburente
- Sorgente d'innesco

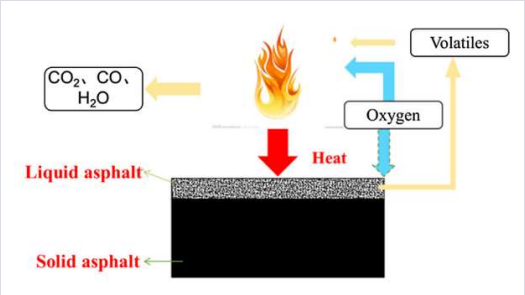


https://www.plastix.it/ritardanti-di-fiamma-ecco-come-funzionano/#:~:text=Meccanismo%20a%20intumescenza&text=La%20differenza%20sostanziale%20rispetto%20al,forma%20azoto%20e%20vapor%20acqueo.

18

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.



F. Xiao, R. Guo, and J. Wang, "Flame retardant and its influence on the performance o asphalt – A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 841–861, 2019,

19

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

Building materials	Asbestos, board	0.96 (40 °C)
	Asphalt pavement	0.85-0.93 (40 °C)
	Clay	0.39 (20 °C)
	Concrete, rough	0.94 (0–100 °C)
	Granite	0.44 (40 °C)
	Gravel	0.28 (40 °C)
	Gypsum	0.9 (40 °C)
	Marble, polished	0.93 (40 °C)
	Mica	0.75 (40 °C)
	Plaster	0.89 (40 °C), 0.48 (540 °C)
	Quartz	0.76 (40 °C)
	Sand	0.83 (40 °C)
	Sandstone	0.83 (40 °C)
	Slate	0.67 (40–260 °C)

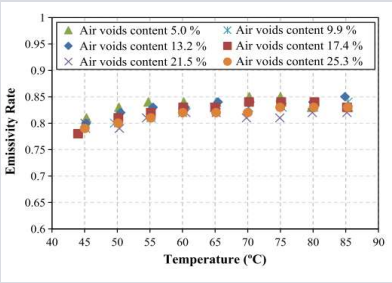
Emissività (ε)

D. J. Rasbash, *The S.F.P.E. handbook of fire protection engineering*, vol. 15, no. 3. 1989.

20

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.



A. Hassn, M. Aboufoul, Y. Wu, A. Dawson, and A. Garcia, "Effect of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 115, pp. 327–335, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.106.

21

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

Inerzia termica

Densità

kg/m^3

Capacità Termica

J/K

Calore specifico

c_S = J/(kg·K)

22

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

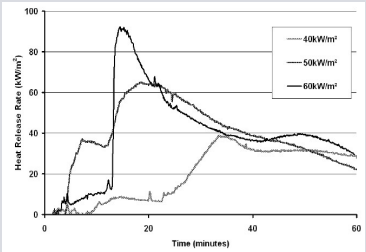
Material	T_{ig} [°C]	$\overline{k s \rho_S C_S}$ [(kW/m²K)².s]
Wood fiber board	355	0.46
Wood hardboard	365	0.88
Plywood	390	0.54
PMMA	380	1.00
Flexible foam plastic	390	0.32
Rigid foam plastic	435	0.03
Acrylic carpet	300	0.42
Wallpaper on plasterboard	412	0.57
Asphalt shingle	378	0.70
Glass reinforced plastic	390	0.32

D. J. Rasbash, *The S.F.P.E. handbook of fire protection engineering*, vol. 15, no. 3. 1989.

23

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

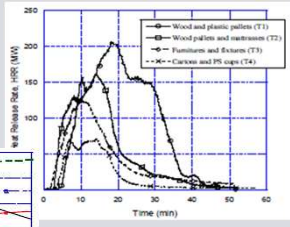


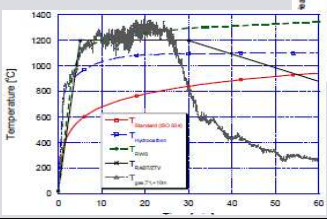
R.O. Carvel, J.L. Torero, "*The contribution of asphalt road surface to fire risk in tunnel fires: preliminary findings*" in: Proceedings of the International Conference on Risk and Fire Engineering for Tunnels, Stations and Linked Underground Spaces, ISBN: 1-901808-25-4, Organized by Tunnel Management International, Hong Kong, 2006, pp. 83–87;

24

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.



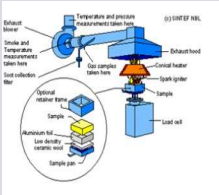


25

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

Cono calorimetrico (ISO 5660-1)



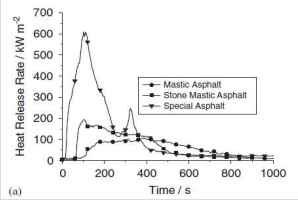
Il test consente di misurare:

- Tempo di ignizione **Tig** [sec]
- Velocità di rilascio del calore **HRR** [kW/m²]
- Picco di velocità di rilascio del calore **PHRR** [kW/m²]
- Calore totale rilasciato **THR** [MJ/m²]

26

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.



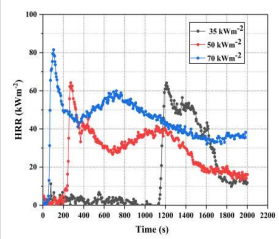
	Mastic Asphalt	Stone Mastic Asphalt	Special Asphalt
t_{ig}/s	106±10	66±3	19±1
PHRR/kW m^{-2}	105±10	189±10	570±40
THR/MJ m^{-2}	57±1	60±3	105±8
EHC/MJ kg^{-1}	25.8±1.4	27.6±0.8	27.7±0.9
Residue/wt%	92.4±0.6	91.7±0.6	84.6±0.8
TSR/m^2 m^{-2}	314±10	1605±20	3713±300
CO-yield/kg kg^{-1}	0.0301±0.002	0.0421±0.001	0.0543±0.002

SHORT COMMUNICATION Fire risks of burning asphalt B. Schartel, H. Bahr, U. Braun and C. Recknagel BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Germany, FIRE AND MATERIALS Fire Mater. 2010; 34:333–340

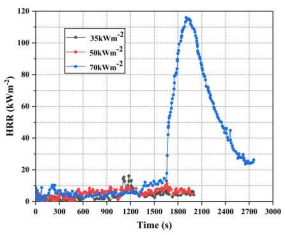
27

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.



a) Dense graded asphalt mixture.



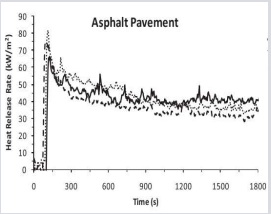
b) Open graded asphalt mixture.

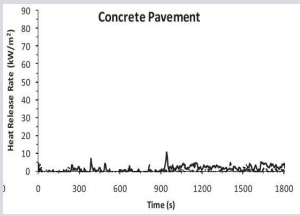
Alice Bonati, Sara Rainieri, Giovanna Bochicchio, Barbara Tessadri, Felice Giuliani – "*Characterisation of thermal properties and combustion behaviour of asphalt mixtures in the cone calorimeter*" - Fire Safety Journal 74 (2015) 25-31;

28

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.



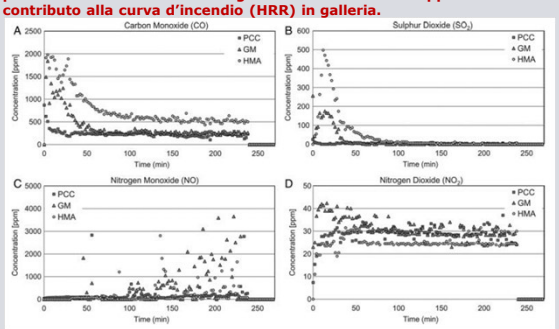


E. Puente, D. Lázaro, D. Alvear – "*Study of tunnel pavements behaviour in fire by using coupled cone calorimeter– FTIR analysis*", Fire Safety Journal 81 (2016) 1–7;

29

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA — autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.



E. Toraldo - "*Comparative laboratory investigation into pavement materials for road tunnels*"- Road Materials and Pavement Design, 2013;

30

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA

autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

E. Puente, D. Lázaro, D. Alvear – "*Study of tunnel pavements behaviour in fire by using coupled cone calorimeter– FTIR analysis*", Fire Safety Journal 81 (2016) 1–7;

31

SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA

autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.

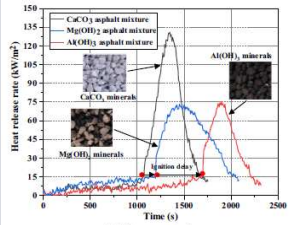
SHORT COMMUNICATION Fire risks of burning asphalt B. Schartel, H. Bahr, U. Braun and C. Recknagel BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Germany, FIRE AND MATERIALS Fire Mater. 2010; 34:333–340

32

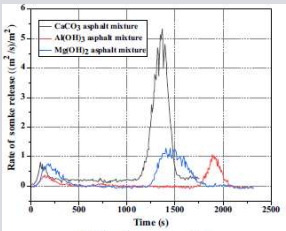
SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA

autostrade per l'italia

❑Titolo Lezione: Titolo della Lezione: Reazione al fuoco delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso. Approfondimenti sul contributo alla curva d'incendio (HRR) in galleria.



(a) Flame retardancy.



(b) Smoke suppression.

A. Bonati *et al.*, "Effect of nanoclay and conventional flame retardants on asphalt mixtures fire reaction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 990–1000, 2013,

33