



S.I.I.V. 2001

XI Convegno Nazionale

**COMFORT GLOBALE E SICUREZZA
D'ESERCIZIO NELLE INFRASTRUTTURE
VIARIE:**

**Un modello matematico per l'analisi delle
relazioni uomo-veicolo-infrastruttura-ambiente**

Ferdinando Corriere

Dipartimento Città e Territorio - Università degli Studi di Palermo
Piazza Bologni, 13 – 90134 – Palermo - Italy
Tel: +39.091.6079228 - Fax: +39.091.6079244
E-mail: corriere@unipa.it

Dario Lo Bosco

Dipartimento di Informatica, Matematica, Elettronica e Trasporti
Università degli studi di Reggio Calabria
Via Graziella- Feo di Vito 89100 – Reggio Calabria – Italy
Tel: +39.0965.875237 - Fax: +39.0965.875247
E-mail: lobosco@unirc.it

COMFORT GLOBALE E SICUREZZA D'ESERCIZIO NELLE INFRASTRUTTURE VIARIE: Un modello matematico per l'analisi delle relazioni uomo-veicolo-infrastruttura-ambiente

FERDINANDO CORRIERE – Dipartimento Città e Territorio – Università di Palermo
DARIO LO BOSCO – D.I.M.E.T. – Università di Reggio Calabria

SOMMARIO

Nel processo di ottimizzazione di un intervento stradale o ferroviario, sia in fase di progettazione dell'opera che di gestione dell'esercizio, è necessario analizzare opportunamente le relazioni esistenti fra le diverse classi di variabili costituenti il complesso sistema "uomo-veicolo-infrastruttura-ambiente"; ciò, onde potere individuare compiutamente le azioni più idonee a massimizzare il comfort di marcia e la sicurezza, nel rispetto delle compatibilità ecosistemiche.

Dal punto di vista metodologico è, a tal fine, possibile affrontare organicamente il problema, sulla base della teoria degli insiemi e del calcolo vettoriale, in un iperspazio \mathbb{R}^d di dimensione d , pervenendo all'individuazione di un caratteristico *vettore comfort globale* \underline{c}_g^i , associabile a ciascuna alternativa i -esima di intervento sulla rete viaria esaminata. In tale ottica, verificato l'opportuno conseguimento anche degli altri obiettivi progettuali strategici (budget finanziario, minimizzazione costo generalizzato del trasporto, etc.), sarà da preferire quella particolare soluzione h per la quale il modulo del vettore \underline{c}_g^h soddisfa la relazione $c_g^h = \max \{c_g^i\}$. L'approccio matematico proposto consente di effettuare nell'ambito dello studio di ottimizzazione intrapreso l'analisi aggregata delle classi di variabili che caratterizzano complessivamente la qualità di marcia per l'utente (talune delle quali pure di origine aleatoria) e permette di definire anche dal punto di vista geometrico le relazioni esistenti fra i predetti indicatori, operando un'opportuna trasformazione di \mathbb{R}^d .

ABSTRACT

In the optimisation process of a road or railway intervention, in the planning stage as well as in the operational management, it is necessary to analyse carefully the relations between the different classes of variables which form the complex system "human being-vehicle-infrastructure-environment" in order to fully determine the most suitable actions for maximising the travelling comfort and safety, with extreme respect for the ecosystem compatibilities.

As far as methodology is concerned, the problem can be tackled, in a systematic way, according to set theory and vector analysis, in a hyperspace \mathbb{R}^d of d -dimension up to determining a characteristic *global comfort vector* \underline{c}_g^i which can be combined with each of the i th alternatives of intervention in the transport network examined. From this point of view, after the proper achievement of the other strategic design objectives has been tested (e.g. financial budget, minimisation of the generalised costs of transport), it is suggested to consider the particular solution h by which the modulus of the vector \underline{c}_g^h

satisfies the relation $c_g^h \approx \max\{c_g^i\}$. The mathematical approach suggested in this study of optimisation, allows to carry out the aggregate analysis of the classes of variables which describe the user's travelling quality on the whole (some, in origin, are even stochastic variables) as well as to define geometrically the relations which exist between the above mentioned indicators through an appropriate transformation of θ^d .

1. LO STUDIO DELLE INTERAZIONI TRA L'UOMO ED IL SISTEMA VEICOLO-INFRASTRUTTURA-AMBIENTE.

Nella progettazione di un intervento sulla rete viaria (nuove costruzioni, azioni di riqualificazione, miglioramento della funzionalità dei nodi, etc), onde garantire i migliori standards prestazionali all'intero sistema di trasporto, sotto il profilo sia dell'economicità ed efficienza in esercizio, che della sicurezza e qualità di marcia, importanza strategica assume l'analisi delle relazioni esistenti fra gli elementi costituenti il caratteristico quadrinomio "uomo-veicolo-infrastruttura-ambiente".

In particolare, nella progettazione di opere stradali, il problema assume, poi, una maggiore complessità, in quanto, a differenza del caso ferroviario, il conducente non possiede alcuna tabella di marcia che gli indichi il comportamento da mantenere sui diversi elementi del tracciato e, dunque, il tipo di marcia e la scelta della velocità è funzione anche della percettibilità dello spazio di traffico e dell'esperienza dell'automobilista. Inoltre, quando la strada è a curvatura nulla, il veicolo non è sottoposto alla forza centrifuga che impegna l'aderenza in senso trasversale ed il conducente ha difficoltà a percepire se la sua velocità di marcia è vicina a quella di progetto.

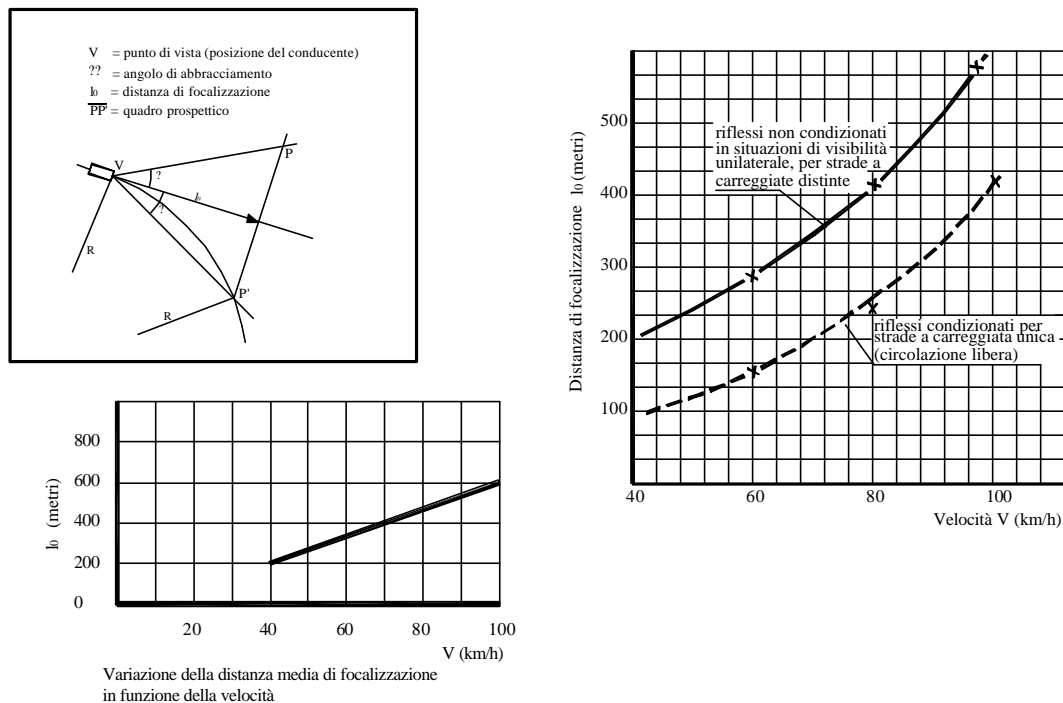


Figura 1 – Visione Interna. Relazioni fra elementi prospettici in condizioni di moto.

Tale difficoltà a valutare se è prossimo al limite di sicurezza è, poi, incentivata dalla circostanza che, all'aumentare della velocità, la distanza di focalizzazione del quadro prospettico si accresce e, contestualmente, si restringe il campo di visibilità periferica orizzontale (Fig.1). Bisogna comunque, evidenziare che le effettive configurazioni di visione prospettica dinamica che si determinano in esercizio dipendono anche dai particolari meccanismi di elaborazione degli "inputs" ricevuti dal guidatore da parte dell'insieme "infrastruttura-ambiente", nonché da specifici fattori esterni, come la pioggia, la nebbia, l'abbagliamento, etc..

Dall'esame delle figure sopra riportate, risulta che il legame funzionale fra le succitate variabili caratteristiche della percezione visiva in condizioni di moto, è anche condizionato dalla particolare configurazione della sezione trasversale; la tipologia della carreggiata esercita, infatti, specifica influenza sulla legge di variazione della distanza di focalizzazione l_0 , in funzione della velocità V del mezzo sulla via.

Al fine di conseguire opportuni standards di qualità nella progettazione, occorre, pertanto, che la scelta delle soluzioni miri anche ad assicurare il necessario equilibrio psicologico al guidatore, limitandone quanto più possibile l'affaticamento durante la marcia.

Il processo di ottimizzazione di un intervento sulla rete viaria non risulta, dunque, sempre agevole e di immediata definizione, poiché sussistono vincoli di diversa valenza e natura.

Purtuttavia, l'introduzione nel problema della sicurezza anche del rispetto del comfort psicofisico del conducente e della connessa verifica puntuale del tracciato, sotto l'ottica delle probabili reazioni psico-visive che in esso si determinano durante il viaggio, consente, assieme allo studio dell'equilibrio dinamico del mezzo, di pervenire ad opportuni standards di comfort globale e di sicurezza in esercizio.

Certamente in tutta questa tematica della qualità della soluzione progettuale intervengono altri fattori non trascurabili, comprese le caratteristiche della sezione trasversale, la tipologia ed i flussi di traffico previsti, la velocità della corrente veicolare, le condizioni meteo-climatiche prevalenti, quelle orografiche e geologiche del territorio, l'incidenza dei costi, etc.

La ricerca della soluzione ottimale, quindi, non può essere indicata da una formula matematica, più o meno complessa, ma va individuata caso per caso, considerando uno o più macro soluzioni alternative, per ciascuna delle quali potrà svolgersi una analisi puntuale delle condizioni offerte e procedere, poi, eventualmente, a correzioni ed adattamenti specifici successivi, onde riuscire ad individuare la scelta di progetto globalmente più confacente.

Dal punto di vista metodologico, può, comunque, procedersi costruendo un opportuno modello interpretativo delle interazioni fra il fenomeno circolatorio (binomio "uomo-veicolo"), la componente di rete interessata (ramo, nodo, impianto, etc.) e l'ambiente, al fine di descrivere compiutamente le relazioni esistenti fra le diverse variabili caratterizzanti sia l'affidabilità del sistema nel suo complesso, che le compatibilità con il territorio, l'efficienza e l'economicità in esercizio della rete interessata, per potere, così, valutare preventivamente la *qualità globale* dell'intervento programmato.

Nella figg. 2 e 3 sono rappresentate, rispettivamente per il caso stradale e ferroviario, alcune classi di indicatori finalizzati all'analisi dei fattori potenziali di rischio per il comfort e la sicurezza, riferibili al caratteristico "fattore uomo", nonché a cause esterne, a problemi riconducibili alla via ed a circostanze di altra natura.

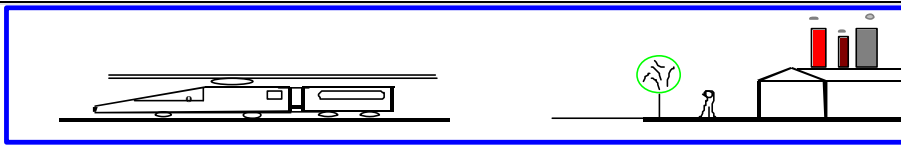


Figura 2-Fattori di rischio per il comfort e la sicurezza d'esercizio nel caso ferroviario.

Uomo	Ambiente	Sistema veicolo - infrastruttura
<i>Conducente</i>	<i>Condizioni atmosferiche avverse</i>	<i>Carenze attribuibili ad opere tecnologiche e ad apparati di linea e di stazione</i>
? Problemi psico-fisici e/o errate valutazioni nella marcia; ? inosservanza dei segnali, di limitazioni o prescrizioni, etc.; ? . . .	? Neve, gelo, turbolenze, nebbia, etc.; ? escursioni termiche eccessive; ? . . .	? Anomalie tecnologiche degli impianti fissi; ? inadeguatezza del materiale rotabile rispetto alle condizioni tipologiche della linea; ? . . .
<i>Personale addetto e operatori</i>	<i>eventi calamitosi ed altri imprevisti</i>	<i>Dissesti ed ammaloramenti del corpo stradale</i>
? Deficit manutentivi; ? carenza nelle procedure di esercizio ed operazioni connesse (inosservanza di norme, regolamenti, etc.); ? . . .	? Movimenti tellurici, smottamenti di terreno, frane, caduta massi, etc.; ? presenza di ostacoli sulla linea, anche a seguito di raffiche di vento o di trombe d'aria, etc.; ? . . .	? Problemi connessi alle tipologie costruttive dei manufatti, etc.; ? carenza di apposito protocollo manutentivo, etc; ? . . .
<i>Passeggeri</i>	<i>Incendi nel territorio interessato ed altre cause esterne</i>	<i>Problemi di funzionamento degli equipaggiamenti fissi e mobili</i>
? Conseguenze derivanti da imprudenze, sabotaggi, etc.; ? trasporto di sostanze pericolose; ? . . .	? Vulnerabilità specifiche del territorio, etc.; ? pedologia e gestione agronomica dei suoli, etc.; ? . . .	? Deficit del materiale rotabile; ? affidabilità componenti del sistema di equipaggiamento e segnalamento per i distanziatori di linea, etc.; ? . . .

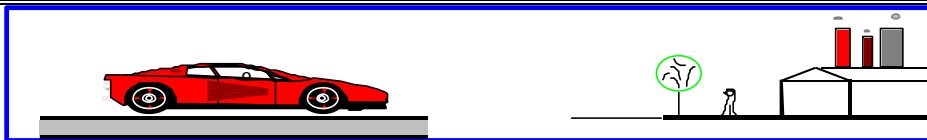


Figura 3-Fattori di rischio per il comfort e la sicurezza d'esercizio nel caso stradale.

Uomo	Ambiente	Sistema veicolo - infrastruttura
<i>Conducente</i>	<i>Condizioni atmosferiche avverse</i>	<i>Deficit dell'infrastruttura</i>
? Comportamenti a rischio, eccessiva velocità di guida, etc.; ? Ridotte capacità psico - fisiche per stress, assunzione di alcolici, etc.; ? . . .	? Presenza di pioggia, di neve, di gelo, di ghiaccio, ovvero di turbolenze, nebbia, etc. ? escursioni termiche eccessive; ? . . .	? Caratteristiche funzionali inadeguate alle prestazioni richieste (aderenza, visibilità, tortuosità, pendenze); ? funzionalità ed efficienza in esercizio della pavimentazione (portanza, regolarità e rugosità);
<i>Enti gestori preposti ed operatori</i>	<i>Eventi calamitosi ed altri imprevisti</i>	<i>Problemi di efficienza del veicolo</i>
? Mancata o carente definizione di regolamenti per l'esercizio e/o di controllo della circolazione; ? Carenza nelle politiche di controllo della domanda e nel protocollo di informazione per l'utenza; ? . . .	? Dissesti idrogeologici del territorio, smottamenti di terreno, frane, caduta massi, etc.; ? movimenti tellurici; ? . . .	? Condizioni e qualità dei pneumatici; ? funzionalità ed efficacia dell'impianto frenante; ? . . .
<i>Passeggeri</i>	<i>Incendi ed altre cause esterne</i>	<i>Carenze attribuibili alla segnaletica</i>
? Imprudenze durante la marcia ? distrazioni del conducente, etc.; ? . . .	? Elementi di rischio di incendio, specifica vulnerabilità del territorio; ? pedologia, gestione agronomica dei suoli e intrusioni di fauna selvatica; ? . . .	? Leggibilità della segnaletica; ? carenza nella gestione e nel controllo dell'efficienza e problemi di manutenzione della segnaletica; ? . . .

2. COMFORT GLOBALE IN ESERCIZIO: UN APPROCCIO METODOLOGICO PER LA CARATTERIZZAZIONE MATEMATICA DEL PROBLEMA.

La ricerca di soluzioni progettuali idonee a garantire soddisfacenti standards di sicurezza e di qualità del viaggio, fra due qualsivoglia relazioni origine-destinazione, è uno degli obiettivi-chiave da raggiungere per ogni intervento da attuare su una rete di trasporto.

Sia nel caso stradale che in quello ferroviario, la scelta plano-altimetrica dell'asse, i valori da assegnare agli elementi geometrici ed il coordinamento fra lo sviluppo orizzontale e verticale del tracciato costituiscono variabili strategiche per pervenire alla compiuta ottimizzazione dell'azione progettuale programmata.

Infatti, in esercizio, tali particolari configurazioni della via, unitamente alle peculiarità dell'ambiente di pertinenza dell'infrastruttura in studio ed alle specifiche prerogative prestazionali e di efficienza del mezzo, determinano precisi "output" nel conducente durante la marcia sul prefissato tracciato, producendo consequenziali livelli di qualità del viaggio anche per i passeggeri.

Il concetto di "comfort globale", che sottende anche quello di "sicurezza", può dunque essere qualitativamente formalizzato come una particolare condizione psico-fisica in cui l'uomo esprime soddisfazione nei riguardi del rapporto intrattenuto con l'ambiente con cui si relaziona. Si tratta in sostanza di una condizione che non può essere valutata soltanto nell'ambito delle interazioni fisiche settoriali fra l'uomo, il veicolo, la strada e l'ambiente, variabili tutte che formano oggetto dello studio, ma che occorre caratterizzare congiuntamente al complesso delle interazioni psicoemotive che durante il moto si realizzano in ogni singolo soggetto, per mezzo del proprio sistema percettivo e sensoriale ed elaborando in modo personale gli inputs ricevuti; ciò, dal momento che la definizione di comfort sopra esposta postula necessariamente un disequilibrio psicoemotivo con posizione vantaggiosa per l'uomo.

Nello stesso approccio fornito per la definizione del problema è insito il modello di studio a cui risulta possibile matematicamente riferirsi: si tratta di un particolare sistema operativo \mathbf{K} atto a definire il rapporto funzionale esistente fra le grandezze tipizzanti il trinomio infrastruttura-veicolo-ambiente, le quali si configurano come stimoli per l'utente, e la condizione di comfort globale registrato; quest'ultimo, a sua volta, rappresenta l'output del sistema analizzato nel suo complesso.

Lo schema di analisi proposto è rappresentato in figura 4.

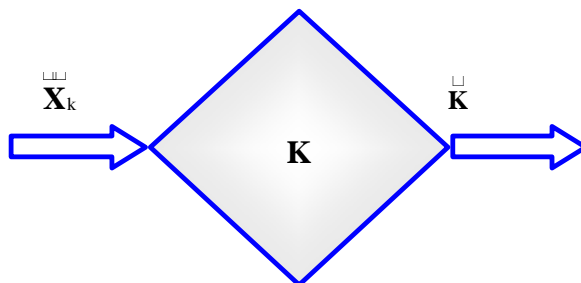


Figura. 4 - Schema operativo del rapporto tra il vettore algebrico $\underline{\mathbf{X}}_k$ delle grandezze stimolanti e la sensazione $\underline{\mathbf{K}}$ indotta.

Sulla base di quanto precede, il problema della ricerca delle condizioni che determinano lo stato di comfort per un utente che viaggia alla velocità V , su un prefissato tracciato, in determinate configurazioni d'esercizio ed utilizzando un dato mezzo, si risolve ricercando gli insiemi dei valori degli elementi del sistema sopra descritto.

Operativamente, occorrerà, allora, analizzare l'insieme delle condizioni di malessere che possono essere indotte sull'uomo dai molteplici effetti su di esso prodotti durante la marcia dal complesso di elementi costituenti il trinomio "veicolo-infrastruttura-ambiente".

Poiché uno stato privo di malessere è determinato da quelle grandezze caratterizzanti tale trinomio che presentano valori ricadenti nel *dominio di tolleranza biologica* dell'utente, ne consegue che lo stato di assenza di malessere individuato dalla non esplicitazione, durante il viaggio, di azioni volontarie di protezione da parte del soggetto interessato.

Consequenzialmente il coacervo degli stati di soddisfazione per gli standards di qualità del viaggio da parte dell'utente stradale o ferroviario, si configura come un particolare sottoinsieme degli stati privi di malessere; discende, dunque, che condizione necessaria perché durante la marcia si verifichi uno stato di comfort è che non si generi malessere (figura 5).

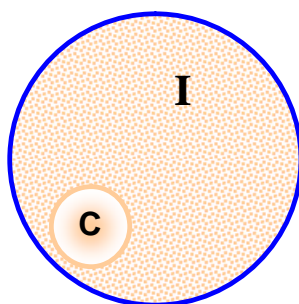


Figura 5 - I denota l'insieme degli stati privi di malessere, C ? I è il sottoinsieme delle configurazioni di comfort.

Secondo tale impostazione, pertanto, il comfort può configurarsi come una grandezza soggettiva del "sistema uomo", di tipo logico; in termini *booleani* [12], può, allora, assegnarsi alle diverse configurazioni che si realizzano in esercizio il valore 1 o 0 (lo stato di comfort esiste, ovvero non esiste). Da quanto precede, è possibile osservare che in materia di comfort, si può solo definire una scala di valutazione e non una unità di misura.

Considerato, poi, che nel caso in studio sono contemporaneamente coinvolti più organi sensoriali, la condizione di "comfort globale" sarà conseguentemente desumibile per mezzo di un prodotto logico e sarà legata alla contemporanea esistenza degli stati di benessere relativi ad ogni singolo settore interessato.

In termini analitici, indicando il *comfort globale* con C_g e con il simbolo j la generica classe sensoriale che fra le d complessivamente considerate, definisce l'indicatore *comfort relativo* C_j , si ha:

$$C_g = C_1 \wedge \dots \wedge C_j \wedge \dots \wedge C_d \quad (1)$$

Al fine di caratterizzare compiutamente il problema, si può considerare l'uomo come un sistema costantemente in interazione con lo spazio circostante, per le

sensazioni che ne trae per mezzo dei propri organi percettivi e sensoriali, (visti come proprietà della *frontiera* di tale insieme), mentre per ambiente dovrà intendersi l'insieme di elementi naturali o costruiti con cui l'uomo coesiste ed esercita scambi di diversa entità e tipologia (inclusando, in tale più generale accezione, anche la stessa infrastruttura ed il veicolo).

L'uomo può, così, essere assimilato ad un sistema **S** rappresentabile per mezzo di opportune coordinate in \mathbb{R}^d ; per tale sistema, però, la coesistenza degli equilibri che si realizzano (meccanico, chimico, termico, etc.) è condizione necessaria ma non sufficiente a determinare una situazione di equilibrio globale; infatti, l'osservazione di variabili del sistema ambiente **A**, come sopra definito, possono indurre nell'uomo sensazioni psicoemotive tali da dar luogo a sue azioni di tipo reattivo e, quindi, per la definizione dell'equilibrio del rapporto interattivo, occorre considerare un idoneo modello interpretativo della realtà in studio.

A tal fine, si consideri una opportuna variabile **U** che tenga conto delle azioni di adattamento e modifica comportamentale dell'utente, a seguito delle sue interazioni con il predetto sistema **A**.

Dette allora $z_1, \dots, z_h, \dots, z_n$ le varie sensazioni che svolgono il ruolo di variabili indipendenti del sistema **S**, esisterà una funzione *f* tale che

$$u = f(z_1, \dots, z_h, \dots, z_n); \quad (2)$$

inoltre, il raggiungimento dell'equilibrio comporta l'esistenza di una particolare funzione φ che soddisfi la relazione

$$u = \varphi(\varphi_1, \dots, \varphi_k, \dots, \varphi_m); \quad (3)$$

essendo $\varphi_1, \dots, \varphi_k, \dots, \varphi_m$ le variabili indipendenti del sistema veicolo-infrastruttura-ambiente.

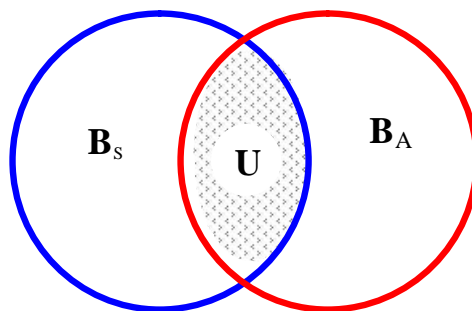


Figura 6 - Insieme U dei valori assunti dalla variabile *u*, ottenuti come intersezione tra gli insiemi dei valori degli indicatori di stato **B_S dell'uomo e quelli **B_A** relativi al sistema veicolo-infrastruttura-ambiente.**

Da quanto precede, considerando la (2) e la (3), si ha:

$$\varphi(z_1, \dots, z_n, \varphi_1, \dots, \varphi_m) = 0 \quad (4)$$

La (4) dimostra che l'insieme **B_S** delle variabili di stato dell'utente che affronta il viaggio e quello **B_A** caratterizzante il trinomio veicolo-infrastruttura-ambiente sono formati da elementi che danno luogo ad un sottoinsieme intersezione **U**, analogamente a quanto avviene, ad esempio, per la temperatura nell'equilibrio termico (Fig.6).

Osserviamo, ora, i domini $Z = (z_1, \dots, z_h, \dots, z_n)$ e $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_k, \dots, \varphi_m)$ sui quali sono definite le funzioni *f* e φ sopra considerate le molteplici interazioni che si

verificano in esercizio fra il sistema **S** (utente stradale o ferroviario) e quello **A**, formato da tutti gli elementi esterni alla frontiera di **S** e con questo interferenti, posto

$$Z = Z_v \cup Z_t \cup Z_a \cup Z_i \cup \dots,$$

ove i simboli v, t, a, i, ..., indicano, rispettivamente, le interazioni visive, termiche, acustiche, igrometriche, etc., si perviene alla relazione:

$$Z \cup U$$

Tale corrispondenza univoca fra le predette grandezze è fornita dalla funzione f della (2). Se ad esempio, si prende in esame l'insieme dei valori delle variabili caratterizzanti le interazioni che si realizzano in condizioni di moto (visione prospettica dinamica [2] [4]), il preposto canale sensitivo del soggetto interessato consente una corrispondenza univoca tra le grandezze ambientali $z_{1v}, \dots, z_{hv}, \dots, z_{nv}$ e la sensazione indotta Z^v che si registra in ciascun istante $t \in [0, T]$, ove T è il periodo di analisi considerato. Detto, allora Z_v l'insieme dei valori z_{1v}, \dots, z_{nv} e Z_v quello originato dai valori della sensazione visiva, si avrà: $Z_v \cup U$.

In virtù di quanto precede, a sua volta, l'insieme

$$Z = Z_v \cup Z_t \cup Z_a \cup Z_i \cup \dots,$$

deve dare luogo ad una specifica variabile u caratterizzante il sistema **A**, con $u_i \in U$.

3. IL VETTORE COMFORT GLOBALE IN ESERCIZIO

Le relazioni esistenti fra gli elementi del quadrinomio uomo-veicolo-infrastruttura-ambiente che hanno dato luogo alla (4), definiscono nell'iperspazio Z^d delle variabili $z_1, \dots, z_n, z_1, \dots, z_m$ gli stati di comfort complessivamente apprezzati dall'utente durante il viaggio.

Il raggiungimento di una qualsivoglia delle sensazioni psicofisiche di benessere c_j (comfort relativo) comporta che sia verificata la relazione

$$c_j \in [c_j^i, c_j^s],$$

avendo indicato con il l'apice i la soglia inferiore dello stato di comfort e con s quella superiore, nell'ipotesi di assumere per ogni classe sensoriale j-esima esaminata un idoneo intervallo $[c_j^i, c_j^s]$ che caratterizzi il campo di esistenza del predetto stato di comfort relativo d'esercizio.

Ad esempio, esaminando il contributo fornito al comfort di marcia ed alla stessa sicurezza d'esercizio dalle peculiari qualità funzionali di una pavimentazione stradale (determinate, com'è noto dalle caratteristiche superficiali della sovrastruttura), occorrerà osservare i valori assunti dalle variabili *aderenza e regolarità* [5], [6], [8], [9].

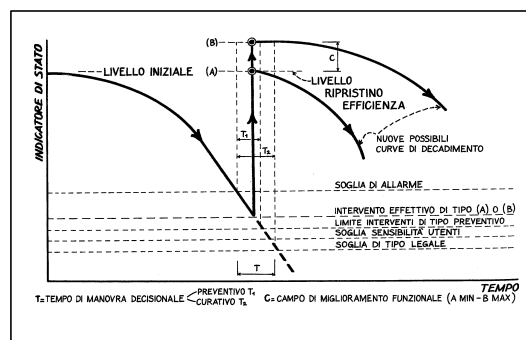


Figura 7 – Schema tipo delle qualità funzionali di una pavimentazione stradale

Tali indicatori, come si evince dallo schema-tipo riportato in figura 7, ammettono sempre un determinato range di valori $\alpha = (s-i)$ entro cui è verificata (sia pur con diverso livello di qualità) l'esistenza dello stato di comfort per l'utente stradale.

Posto $Z_\alpha = (Z^s - Z^i)$ e $\alpha = \alpha_1, \dots, \alpha_m$, costruiamo, ora, delle particolari *variabili ridotte*, operando, dal punto di vista geometrico, una trasformazione di coordinate dei punti dello spazio \mathbb{R}^d

$$\alpha_1 = \frac{Z_1^s - Z_1^i}{Z_\alpha}, \dots, \alpha_m = \frac{Z_m^s - Z_m^i}{Z_\alpha} \quad (6)$$

?

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_1^s - \alpha_1^i}{\alpha}, \dots, \alpha_m = \frac{\alpha_m^s - \alpha_m^i}{\alpha} \quad (7)$$

In virtù delle (6) e (7), la (4) diviene

$$F(\alpha_1, \dots, \alpha_m) = 0,$$

individuando una superficie nel nuovo spazio ridotto \mathbb{R}^d che risulta essere definito rispetto ad assi fra di loro *dimensionalmente omogenei* (così come avviene per lo spazio euclideo).

In esso, il livello di soglia inferiore (ridotto) di comfort corrisponde all'origine 0 degli assi, mentre i punti P_s caratterizzanti la soglia superiore appartengono ad un'ipersfera di equazione

$$\alpha_1^2 + \dots + \alpha_m^2 = 1 \quad (8)$$

Pertanto, se P è il punto geometricamente rappresentativo di una generica condizione di comfort dell'utente considerato, il segmento orientato $OP \in [0, 1]$ costituisce in \mathbb{R}^d la misura della distanza per quella specifica configurazione dalla soglia inferiore di comfort, rapportata all'intero intervallo di variazione $\alpha = (s-i)$ considerato.

Infine, se rispetto ai predetti assi di riferimento è possibile denotare con \vec{c} il vettore comfort globale in \mathbb{R}^d , geometricamente individuato da OP, avente le seguenti componenti

$$\vec{c} = \alpha_1 \vec{e}_1 + \dots + \alpha_m \vec{e}_m, \quad \text{con} \quad \begin{cases} \alpha_1^2 + \dots + \alpha_n^2 = 1 \\ \alpha_1^2 + \dots + \alpha_m^2 = 1 \end{cases}$$

?

il cui modulo $|\vec{c}|$, in virtù della (8), dovrà sempre risultare ≤ 1 .

La particolare scelta operata con le (6) e (7) per la definizione di \mathbb{R}^d , per le proprietà di omogeneità che caratterizzano lo spazio ridotto costruito con la trasformazione di \mathbb{R}^d , consente di pervenire ad un'espressione vettoriale della (1):

$$\vec{c}_g = \sum_{i=1}^d \alpha_i \vec{e}_i \quad (1')$$

Il comfort globale (La particolare definizione dello stato di comfort, formulata nel precedente paragrafo 2, consente di non introdurre, nella trattazione del problema, specifici coefficienti ponderali α_i tipizzanti la differente importanza eventualmente attribuibile da parte degli utenti a ciascuna delle classi sensoriali), pertanto, potrà essere

espresso dal vettore \underline{c}_g , avente come componenti i singoli vettori \underline{c}_i ($i=1,\dots,d$) che definiscono in \mathbb{R}^d le specifiche condizioni di comfort relative a ciascuna delle classi sensoriali considerate per l'analisi della qualità e sicurezza di marcia nello studio di ottimizzazione dell'intervento stradale o ferroviario in esame.

4. CONCLUSIONI

Obiettivo fondamentale della progettazione di una strada ordinaria o ferrata è quello di assicurare, mediante appropriate caratteristiche geometriche e prestazionali da conferire all'infrastruttura (comprese adeguate opere di arredo, segnaletica, etc.), il soddisfacimento della domanda di mobilità di persone e merci, garantendo una marcia regolare e sicura del flusso di traffico.

La ricerca scientifica nel settore delle infrastrutture viarie, in tema di sicurezza e qualità del deflusso, ha sempre più suggerito di porre il comportamento dell'utente (in particolar modo nel caso di strade non a guida vincolata) al centro delle scelte tecniche di progetto, sia per le nuove opere che per l'attuazione di altri interventi sulla rete (riqualificazione funzionale, calibrazione degli svincoli, etc.).

Lo studio del sistema "uomo-veicolo-infrastruttura-ambiente" svolto nella presente memoria, ha consentito di pervenire alla definizione di un apposito modello matematico per l'analisi integrata delle molteplici componenti che caratterizzano la qualità di marcia per l'utente e che influenzano la stessa sicurezza d'esercizio.

L'impostazione matematica del problema proposta, che fa riferimento alla teoria degli insiemi ed al calcolo vettoriale, permette un'opportuna interpretazione geometrica in un iperspazio di dimensioni d e ben si presta pure alle elaborazioni computerizzate.

In particolare, il criterio proposto, mediante l'analisi in \mathbb{R}^d del *vettore comfort globale in esercizio* \underline{c}_g^i costruito per ciascuna i -esima alternativa di intervento esaminata, consente di acquisire le informazioni utili a pervenire compiutamente alla scelta della migliore soluzione di progetto. In tale ottica, per assicurare una soddisfacente qualità di marcia all'utenza ed accrescere in modo correlato gli standards di sicurezza sarà, così, da preferire quella specifica opzione h che soddisfa la relazione

$$|\underline{c}_g^h| \geq \max_i |\underline{c}_g^i|$$

BIBLIOGRAFIA

- [1] Tomazinis A.R. (1975), *Productivity, efficiency, and quality in urban transportation systems*, Lexington Books, Lexington Mass.
- [2] Stoka, M. (1975 - 1976) *Probabilitè gèomètriques de type "Buffon" dans le plan euclidien*, Atti Acc, Sci. Torino, vol. 110.pp. 53 - 59.
- [3] Tesoriere G., Lo Bosco D. (1984-85), *Le caratteristiche geometriche da assegnare alle strade secondarie ed il coordinamento plano altimetrico dei tracciati*, Atti dell'Accademia di S.L.A. di Palermo Serie V, vol. IV, parte I.
- [4] Marchionna A., Farnaci M. (1986), *Durata residua delle pavimentazioni flessibili basata sulla valutazione del livello di degradazione degli stati legati ottenuto con il F. W. D.*, Cagliari 6/86.
- [5] Lo Bosco D. (1988), *Visione interna ed anomalie ottiche dei tracciati stradali costituenti la viabilità secondaria*, Selezione tecnica, n. 9, Settembre.

- [6] CNR (1988), *Norme tecniche – Istruzioni sulla manutenzione della pavimentazione stradale*, BU 125/88.
- [7] Agostinacchio M. (1989), *La manutenzione delle pavimentazioni stradali*, Giornata di studio – Università della Basilicata, 11/89.
- [8] Gatti G. (1990), *Caratteristiche di affidabilità di un itinerario stradale*, XXI Convegno nazionale stradale, Trieste.
- [9] Boscaino G., *La manutenzione programmata della rete viaria*, Giornata di studio – Cagliari 4/90.
- [10] Consiglio di Corso di laurea di Ingegneria Civile Università di Palermo, Atti (1991) della giornata di studio sul tema *La manutenzione programmata delle pavimentazioni stradali*, Agrigento, 23 Febbraio.
- [11] Corriere F. (1992), *Affidabilità, efficienza e vulnerabilità del sistema dei trasporti: criteri e metodi per la programmazione degli interventi*, Selezione tecnica - Aprile.
- [12] Di Mino G., Lo Bosco D. (1993) *La progettazione integrata delle infrastrutture viarie*, Le strade, anno XCV, n. 1295, Luglio/Agosto.
- [13] Stoka M. (1994), *Calcolo delle probabilità e statistica*, Ed. Cedam
- [14] Lo Bosco D. (1995), *Studio del binomio “strada-ambiente”*, Autostrade, anno XXXVII, n. 1, Gennaio/Marzo,
- [15] Atti della Giornata di Studio (1997) “*La sicurezza intrinseca delle infrastrutture stradali*”, Roma 20- 21 Febbraio.
- [16] Zhou M., Sisiopiku V.P. (1997), *Relationships between Volume-to-capacity ratios and accident rates*, Transportation Research Record n. 1581, pp. 47-52.
- [17] Crotti A. (1997), *La valutazione della sinistrosità autostradale*, Le strade, Novembre-Dicembre.
- [18] CNR (1998), Criteri per la classificazione della rete delle strade esistenti ai sensi dell’art. 13 comma 4 e 5 del nuovo codice della strada Roma, 27 Febbraio.
- [19] Caliendo C. (1998), *Analisi di incidentalità sulle strade per le quali sono previsti interventi migliorativi*, Ministero dei lavori pubblici “Per restare in Europa: le infrastrutture fisiche”, vol. 5 Allegato 2 pp. 55-75.
- [20] Corona G., Pau M., Piras M., (1999), *Studio delle correlazioni tra indici di sinistrosità e caratteristiche geometriche e funzionali di una rete stradale regionale*, Sistemi di trasporto n.1.
- [21] Atti del IX Convegno Nazionale S.I.I.V. (1999) sul tema: Pianificazione e gestione di infrastrutture ferroviarie e aeroportuali. Cagliari, 28 - 29 Ottobre.
- [22] Atti dell’Accademia Nazionale di Scienze, Lettere ed Arti (1999), Classe di scienze, I semestre, parte II.
- [23] Caroti L., Lanceri F., Losa M., Branca L. (2000), *La sicurezza stradale: condizioni ambientali e parametri dell’infrastruttura*, Strade e Autostrade, n. 2 Marzo/Aprile.
- [24] Atti del X Convegno Nazionale S.I.I.V. (2000) sul tema: Infrastrutture viarie del XXI Secolo, Catania 26 – 28 Ottobre.
- [25] Duma A., Stoka M. (2000), *Geometric probabilities for non convex lattices*, Ann. De l’I.S.U.P., vol. XXXXIV, Fasc 1, pp. 35-46.