

L'EFFICIENZA GLOBALE DELLE INFRASTRUTTURE STRADALI COME ELEMENTO CARATTERIZZANTE LA SICUREZZA DI PERCORRIBILITA'

SASCIA CANALE

FRANCESCO NICOSIA

SALVATORE LEONARDI

SOMMARIO

L'eccessivo incremento di traffico veicolare sulla rete stradale italiana genera non pochi problemi inerenti alla sicurezza del viaggio, soprattutto in quelle zone ove si manifesta la combinazione tra il degrado strutturale e l'elevato carico veicolare.

Il compito degli amministratori è quello di mantenere alto il livello di funzionalità delle infrastrutture viarie; spesso, però, le ristrettezze del budget costringono i gestori a traslare nel tempo gli interventi manutentivi che, spesso, vengono eseguiti più per "sensibilità" dei "cantonieri" che per scelte programmate.

Con la presente ricerca, si vuole mettere a punto una metodologia per individuare l'efficienza e per la programmazione degli interventi manutentivi, basata sullo studio combinato del degrado strutturale, delle caratteristiche geometriche e dell'entità del traffico.

ABSTRACT

The excessive increase of vehicular traffic in Italian road network, causes few problems concerning safety trips, especially where exist a structural decay and a high vehicular load.

Administrators' assignment is to keep high the functional level of road network's infrastructures; but the narrow circumstances, often, force the operators to put off the upkeep, that often are executed owing to "road inspectors" "sensitivity", rather than programmed choices.

With this research we want to set up a methodology for to know the efficiency and for programmed interventions of maintenance, founded on the combined study of structural decay, the geometric characteristics and the road traffic.

1. PREMESSE

Negli ultimi decenni, le problematiche inerenti alla manutenzione stradale sono state oggetto di continui approfondimenti e ricerche da parte degli studiosi del settore. Anche le istituzioni pubbliche e private si sono ugualmente impegnate nella ricerca, per la rilevanza che la manutenzione ha assunto nella vita economica.

La crescente "domanda" di mobilità, connessa allo sviluppo economico e produttivo delle nazioni, ha determinato un notevole incremento di domanda delle risorse necessarie, sia per la costruzione, sia per la manutenzione del sistema di infrastrutture. Le risorse a disposizione delle nazioni devono essere impiegate in maniera efficiente, soprattutto quando esse risultano "scarse".

Con specifico riferimento al settore della manutenzione delle infrastrutture stradali, l'impiego "efficiente" di risorse scarse, pone domande del tipo:

- come è possibile affrontare, già in fase di progettazione, le problematiche di manutenzione;
- come caratterizzare lo stato attuale di una infrastruttura ed il suo livello di servizio offerto;
- come prevedere l'evoluzione delle sue caratteristiche fisico-meccaniche a medio e lungo termine in relazione al tipo di intervento attuato;
- come ricercare strategie ottimali di spesa nell'ambito di vincoli di bilancio;
- come formulare programmi ottimali annuali o pluriennali di intervento attivo a livello di rete.

Fornire risposte adeguate alle questioni esposte è stato, negli ultimi decenni, uno degli obiettivi principali della ricerca nel settore. Le "Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale" (Boll. N° 125 del 20/4/1988) emanate dal CNR, da un lato forniscono direttive efficaci sulla manutenzione programmata, e dall'altro confermano l'esigenza di ulteriori ricerche.

In questa memoria, facendo nostri gli interrogativi suddetti, si tenterà di fornire le indicazioni per la definizione di un indice sintetico di classificazione dello stato di "degrado" e per un'organizzazione innovativa degli interventi manutentivi.

La metodologia proposta, rielaborando i "fondamenti" delle procedure di analisi del rischio ampiamente utilizzate in campo "economico" ed in campo "industriale", intende indirizzare la programmazione delle opere di manutenzione verso scelte condizionate dal "rischio di funzionalità complessivo dell'infrastruttura stradale".

2. I CRITERI DI PROGETTAZIONE

Il continuo aumento del traffico stradale determina, su tutto il sistema infrastrutturale, seri problemi di durabilità delle opere.

Nelle fasi di progettazione di un'opera, il tecnico fa sempre riferimento al concetto di **vita utile**, cioè quel periodo di tempo al di là del quale lo stato di degrado raggiunto dall'opera è tale da renderne necessario il rifacimento.

Nel caso delle infrastrutture viarie, l'elemento strutturale che subisce i danni maggiori è rappresentato dalla sovrastruttura, per la quale il processo di degrado è tanto più accelerato ed accentuato quanto più elevata è la percentuale di mezzi pesanti gravanti sulla stessa.

Al degrado della sovrastruttura è strettamente connessa la mancanza di sicurezza del trasporto. E' a tutti noto che, durante il moto, il veicolo scambia con la superficie viaria un

sistema di forze che gli consente di avanzare e di mantenere le corrette caratteristiche di direzionalità; è pertanto facile intuire come qualsiasi situazione di deterioramento pregiudicante la corretta conformazione del piano viario, possa indurre a problemi di insicurezza e di rischiosità nella circolazione.

Già in fase di progetto è possibile prevedere la funzionalità delle sovrastrutture viarie, tramite l'adozione di adeguati criteri di dimensionamento:

- *Criterio di dimensionamento fondamentale;* richiede un forte investimento iniziale, tale da soddisfare i requisiti di funzionalità per tutta la vita utile; al termine di quest'ultima occorre provvedere al rinnovamento degli strati portanti (rifacimento completo della sovrastruttura stradale). Prevede soltanto una manutenzione di tipo ordinario.
- *Criterio di dimensionamento progressivo o per fasi;* prevede un investimento iniziale inferiore a quello previsto dal criterio fondamentale, ma necessita di una strategia di manutenzione tale da assicurare la dovuta funzionalità. E' una soluzione che comporta spese di costruzione basse. Gli interventi di manutenzione, di natura ed entità diverse, richiedono invece oneri finanziari, seppur differiti nel tempo, molto elevati.
- *Criterio di dimensionamento a manutenzione - zero;* richiede un investimento iniziale di gran lunga maggiore di quello previsto nelle altre soluzioni. Questo criterio si fonda sulla presunzione di assenza totale di manutenzione durante l'arco di tempo fissato in sede di progetto; pertanto, teoricamente, dovrebbe assicurare all'infrastruttura una vita utile praticamente infinita. Nella realtà è sempre necessario un minimo di manutenzione per sanare i difetti puntuali che si riscontrano durante l'esercizio.

La figura 1 fa notare, in modo qualitativo, la differenza tra i tre criteri di dimensionamento appena descritti.

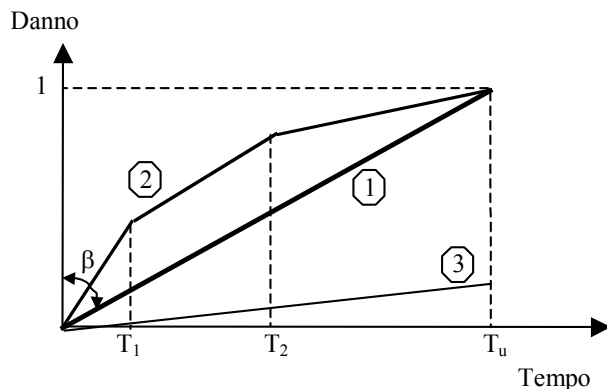


Fig. 1 - Criteri di dimensionamento: 1) fondamentale; 2) progressivo; 3) a manutenzione - zero.

In ascisse è stato riportato il tempo che intercorre dal momento di inizio-esercizio dell'opera al momento (T_u) del raggiungimento della vita utile; in ordinate è stato riportato il danno a fatica prodotto dai carichi di traffico, valutato secondo la relazione di Miner.

Dall'analisi della figura 1 si evince che:

- nel caso dei criteri 1 e 2 si prevede che il danno cumulato alla fine della vita utile sia il massimo raggiungibile (la struttura diventa inservibile);
- secondo il criterio 3, il danno cumulato al termine del periodo di progetto è notevolmente inferiore all'unità, in quanto la pavimentazione è stata progettata per

continuare a rimanere in servizio (ovviamente con i dovuti interventi manutentivi);

- le variazioni di pendenza della spezzata rappresentante il criterio 2 (dimensionamento progressivo), individuano i due momenti (T_1 e T_2) in cui occorre intervenire con un rinforzo della struttura mentre l'angolo β , formato tra la generica curva, rappresentante l'evoluzione nel tempo del danno a fatica, e l'asse delle ordinate, è proporzionale all'entità del dimensionamento iniziale della pavimentazione e quindi al suo costo di costruzione;
- i tratti successivi al primo (curva 2) presentano una pendenza minore di quella della curva 1; ciò è indicativo del fatto che il danno unitario sotto un ciclo di carico, dopo il primo rinforzo, è minore per la soluzione di dimensionamento progressivo rispetto a quella fondamentale.

Dalle osservazioni svolte è possibile dedurre che il tasso d'attualizzazione dei costi, qualora riduca il costo delle opere dilazionate nel tempo, può rendere appetibile economicamente una soluzione del tipo progressivo, la cui adozione è condizionata da una valutazione molto attenta sia del tasso d'inflazione che del tasso del costo del denaro. Viceversa, il criterio a manutenzione zero, richiedendo un elevato investimento iniziale (dovuto al costo di costruzione) ma riducendo teoricamente a zero i costi d'esercizio (dovuti alla manutenzione), rappresenta una valida alternativa nei casi in cui l'incremento del costo del trasporto (a causa delle interferenze sul traffico dovute ai lavori di manutenzione), raggiunga valori intollerabili per la società.

In definitiva la scelta del criterio di dimensionamento deve discendere da un'analisi d'ottimizzazione, tendente a minimizzare il costo che la società deve sostenere sia per la realizzazione dell'opera, sia per il mantenimento della sua funzionalità.

3. L'ANALISI DEL RISCHIO APPLICATA ALLA MANUTENZIONE DI UNA SOVRASTRUTTURA STRADALE

Tutti gli interventi manutentivi costituiscono un impegno finanziario per il gestore dell'infrastruttura, il quale è spesso costretto a programmare la "manutenzione" tenendo conto del suo "budget".

L'individuazione degli interventi manutentivi non risulta semplice soprattutto quando essi sono numerosi e non univocamente determinati.

Mediante l'analisi del rischio è possibile determinare un indice, detto di Efficienza Globale, con cui poter individuare e programmare le opere in base al "rischio di funzionalità complessivo dell'infrastruttura".

Presupposto della teoria del rischio è il concetto di sicurezza di funzionamento.

Consideriamo una pavimentazione costituita da una popolazione di n sezioni tutte correttamente funzionanti, ossia che si presentino in una determinata condizione durante il tempo t , chiamiamo "guasto" un degrado eccessivo che possa originare un evento sfavorevole (decadimento delle caratteristiche di percorribilità della sezione). Definiamo sicurezza $s(t)$, riferita al tempo t , nei riguardi dell'evento sfavorevole, il rapporto tra il numero $x(t)$ delle sezioni non affette da quel "guasto" dopo il tempo t ed il numero totale delle sezioni n .

Il decadimento delle varie sezioni stradali risulta differente perché è in diretta relazione con le sollecitazioni esercitate dai veicoli.

L'insicurezza o pericolo (p) rappresenta la probabilità che avvenga un guasto ed è rappresentabile dalla formula:

$$p = 1 - s(t)$$

Il rischio rappresenta la possibilità che una situazione di pericolo si trasformi in danno.

Il rischio $R(t)$ al tempo t viene definito mediante le leggi della probabilità composta come il prodotto tra la probabilità di non funzionamento al tempo t ("pericolo"), la probabilità di accadimento dell'evento sfavorevole (k), e la probabile entità del danno associato all'evento (d): $R(t) = p \cdot k \cdot d$

È opportuno evidenziare che a parità di sicurezza (ossia del rapporto fra il numero di sezioni in cui non sono presenti ammaloramenti ed il numero totale delle sezioni in cui viene suddivisa l'infrastruttura), il rischio assume valori molto diversi perché è in correlazione con il danno probabile; quindi, ad un danno maggiore non necessariamente corrisponde un rischio maggiore.

Nel caso della pavimentazione di un'infrastruttura stradale, i rischi possono essere distinti in tre classi:

- **rischi convenzionali** (ammaloramento dello strato superficiale in sezioni dove le forze scambiate tra veicolo e strada risultano modeste (zone percorse a bassa velocità));
- **rischi specifici** (decadimento delle caratteristiche superficiali in sezioni dove è importante che lo scambio di forze tra veicolo e pavimentazione risulti controllabile (rettifili, curve non veloci, ecc.));
- **rischi grandi** (decadimento eccessivo delle caratteristiche superficiali in quelle zone dove è richiesto il massimo scambio di forze tra veicolo e strada (curve veloci, zone di frenatura, ecc.)).

La valutazione dell'entità del rischio comprende l'analisi della probabilità dell'evento e delle conseguenze ad esso associate.

Per calcolare la probabilità di un evento relativo ad un determinato processo, risulta di grande aiuto la metodologia dell'albero degli eventi. Essa si basa sul frazionamento di un "sistema" in tanti "microsistemi" che, a loro volta, vengono posti in relazione con un evento iniziale rappresentante la causa potenziale di pericolosità.

La valutazione dei rischi consente l'individuazione delle misure preventive e protettive. Nel caso specifico di una sovrastruttura stradale, l'applicazione di tale metodologia, si articola in quattro fasi fondamentali:

- 1) individuazione delle situazioni di "pericolo";
- 2) identificazione delle situazioni di pericolo;
- 3) valutazione dei corrispondenti rischi e formulazione di un giudizio di accettabilità;
- 4) adozione delle misure di prevenzione che sono rivolte a ridurre i "rischi" non eliminabili.

La scelta del tempo e del modo di intervento è sempre basata sul concetto di rischio accettabile. Infatti, il gestore tenderà ad allontanare l'esecuzione delle opere di manutenzione fino a quando riterrà accettabile il rischio.

4. MANUTENZIONE PROGRAMMATTA DELLE INFRASTRUTTURE STRADALI

Nel termine generale di manutenzione, sono compresi gli interventi volti a conservare e ripristinare le caratteristiche strutturali e funzionali delle infrastrutture stradali, al fine di assicurare il loro impiego in condizioni ottimali.

In relazione alle previsioni di incremento del traffico e di aumento dei carichi applicati, è necessario approntare

strumenti di analisi definiti "sistemi di gestione programmata".

Questi strumenti sono necessari al gestore dell'infrastruttura perché simulano il comportamento nel tempo dell'insieme delle strutture e permettono, a loro volta, di individuare le opere manutentive necessarie nel breve e nel lungo periodo.

Mentre fino a poco tempo fa si parlava quasi esclusivamente di interventi di manutenzione tecnica, adesso si tende a mettere in relazione i momenti della decisione amministrativa e tecnica insieme.

Tutti i sistemi di gestione programmata sono strutturati in tre diverse componenti:

- la costituzione e l'aggiornamento della banca dati;
- l'analisi e la valutazione delle condizioni di esercizio, basate su prove sperimentali e su indagini teoriche;
- l'elaborazione del modello di usura e di decadimento nel tempo, in relazione alle varie tipologie di manutenzione.

E' l'insieme coordinato di queste attività a garantire l'efficacia e l'affidabilità degli interventi prevedibili ai fini della tecnica di manutenzione delle pavimentazioni stradali.

In altri termini, mentre fino ad ora le decisioni sulla manutenzione sono state prese sostanzialmente dai tecnici responsabili di ciascuna infrastruttura, oggi sembra più corretto definire in termini oggettivi le modalità e i tempi di manutenzione al fine di ottimizzare anche l'impiego delle risorse finanziarie disponibili.

Ogni atto di valutazione delle condizioni di esercizio delle pavimentazioni deve basarsi sulla considerazione di due momenti fondamentali, consistenti in primo luogo nella individuazione delle condizioni in cui si trova la pavimentazione e in secondo luogo nella revisione delle sue condizioni dopo x anni di esercizio se oggetto di un intervento di manutenzione y .

Tra gli indicatori del comportamento delle pavimentazioni sono stati particolarmente studiati la deflessione sotto carico, la regolarità superficiale, gli ammaloramenti, la scivolosità.

Tra i sistemi di misura degli indicatori di stato si possono utilizzare i metodi non distruttivi basati sull'utilizzo di particolari apparecchiature (FWD, SCRIM, SUMMS, profilometri inerziali a raggi laser, ecc.).

Quanto al modello di previsione del comportamento futuro delle pavimentazioni, l'attendibilità dei modelli utilizzati è tanto maggiore quanto lo è la disponibilità dei dati e delle notizie storiche sul comportamento passato delle pavimentazioni in esame, in rapporto alle sollecitazioni e agli interventi a cui esse sono state sottoposte.

5. ELABORAZIONE DEGLI INDICI DI EFFICIENZA DI UNA INFRASTRUTTURA STRADALE

Allo scopo di caratterizzare le infrastrutture stradali in funzione della loro efficienza, occorre, in primo luogo, conoscere i valori di ammaloramento per i tre indicatori di stato (aderenza, portanza e regolarità).

La necessità di collegare i tre indicatori di stato con la funzionalità dell'infrastruttura è dovuta al fatto che essi degradano con il tempo fino a raggiungere limiti non più accettabili per il normale funzionamento della sovrastruttura.

Questi limiti, possono essere rappresentati dagli intervalli di tempo necessari affinché ogni singolo indicatore raggiunga un valore inaccettabile per la sicurezza e il comfort degli utenti.

Risulta di fondamentale importanza l'introduzione del concetto di "Intervento di Manutenzione", con il quale si intende quel particolare procedimento che permette di risanare

i valori degli indicatori di stato, in modo da far riacquistare alla sovrastruttura la relativa efficienza.

In questo contesto ci sembra opportuno dare una descrizione sintetica dei tre indicatori di stato:

- L'aderenza è quel meccanismo in virtù del quale una ruota in moto di rotolamento trasmette al terreno, attraverso le zone di reciproco contatto, tre sistemi di forze: forze normali, forze trasversali, forze dirette nella direzione del moto. Il coefficiente di aderenza trasversale (CAT) viene valutato a mezzo di misure dirette di aderenza tramite apparecchiature come lo SCRIM o il SUMMS.
- La regolarità si può definire come quella caratteristica superficiale la cui misura indica il mantenimento della quota dei piani di progetto ossia la continuità del profilo in tutte le direzioni. Il valore dell'indice di regolarità I.R.I. (International Roughness Index) si valuta attraverso la correlazione con le misure ottenute a mezzo di profilometri (come l'APL e l'ARAN).
- La portanza è definita come la capacità di resistere alle sollecitazioni provenienti dal transito dei veicoli. Come valore dell'indice di portanza è possibile considerare lo spessore di rinforzo ottenuto mediante l'elaborazione dei dati puntuali ottenuti tramite deflettometri come il FWD (Falling Weight Deflectometer).

Una volta quantificato lo stato di degrado a mezzo degli indicatori suddetti, è possibile impostare una metodologia di indagine fondata sulla definizione di una serie di indici di ammaloramento in funzione dell'importanza del danno sulla pavimentazione stradale.

L'indice relativo ad ogni fattore di degrado deve essere valutato in base all'incidenza sull'efficienza complessiva della infrastruttura.

E' infatti evidente che l'ammaloramento riscontrabile nelle varie sezioni stradali, anche se di entità simile, deve essere ponderato in maniera differente in funzione dei seguenti parametri:

- tipologia di ammaloramento (CAT, IRI, Rinforzo);
- posizione del tratto ammalorato, dal punto di vista del percorso (corsia di marcia, corsia di sorpasso);
- caratteristiche altimetriche (pendenza longitudinale positiva o negativa);
- caratteristiche planimetriche (curva, rettilineo, cloido).
- importanza della tratta dal punto di vista del traffico.

Diviene pertanto necessario definire gli indici adeguati a schematizzare la tratta in funzione dei parametri esposti.

5.1 L'Indice di Ammaloramento Complessivo (IAC)

L'Indice di Ammaloramento Complessivo è un parametro demandato a sintetizzare l'influenza (dal punto di vista del rischio) dei tre indicatori (portanza, aderenza, regolarità).

Essendo necessario rendere confrontabili fra loro i tre differenti tipi di degrado, è indispensabile associare al singolo valore di degrado di ogni indicatore di stato, il cosiddetto Grado di Ammaloramento (G.A). Quest'ultimo viene definito come quel coefficiente, rappresentato da un numero puro, variabile da zero (caso di ammaloramento nullo), all'unità (caso di massimo ammaloramento), che fornisce informazioni sullo stato di "salute" della sezione considerata.

Nel calcolo dell'Indice di Ammaloramento Complessivo (IAC), è importante analizzare l'enorme influenza che hanno sull'analisi del rischio le differenti tipologie di degrado (CAT, IRI o Rinforzo); per questo motivo, è stato necessario introdurre un ulteriore parametro, definito Peso dell'indicatore di Stato (P.S.), di cui riportiamo nella tabella 1 i valori da esso assumibili.

Indicatore di Stato	Peso dell'indicatore di Stato "P.S"
CAT	1.5
IRI	1.25
Rinforzo	1

Tab. 1 - Pesì di degli indicatori di Stato (P.S.)

Dall'analisi della tabella 1, si nota che è stato assegnato un peso maggiore (rispetto agli altri due) al Grado di Ammaloramento (G.A.^{CAT}) dell'indicatore di stato "rugosità", in quanto, è quello che influenza in modo più rilevante le due variabili dell'analisi del rischio (cioè, l'entità del danno e la probabilità che avvenga tale danno).

All'indicatore di stato "regolarità" è stato assegnato un peso maggiore rispetto alla "portanza", poiché esso, oltre ad influenzare in modo maggiore (rispetto alla portanza) la probabilità che avvenga realmente un danno, ha un peso molto rilevante sul comfort di guida.

L'Indice di Ammaloramento Complessivo "IAC" di una generica sezione omogenea è stato definito come la somma dei prodotti dei singoli Gradi di Ammaloramento (G.Aⁱ), per i relativi Pesì di Stato (P.Sⁱ), rapportata alle peggiori condizioni:

$$IAC_i = \frac{(GA_i^{CAT} \times PS^{CAT}) + (GA_i^{IRI} \times PS^{IRI}) + (GA_i^{FWD} \times PS^{FWD})}{(GA_{max}^{CAT} \times PS^{CAT}) + (GA_{max}^{IRI} \times PS^{IRI}) + (GA_{max}^{FWD} \times PS^{FWD})}$$

Riportiamo nella tabella 2 le varie classi di variazione dell'Indice di Ammaloramento Complessivo.

INDICE DI AMMALORAMENTO COMPLESSIVO (I.A.C.)	
INTERVALLO DI VARIAZIONE	AMMALORAMENTO
IAC = 0	NULLO
0 < IAC ≤ 0.33	BASSO
0.33 < IAC ≤ 0.66	MEDIO
0.66 < IAC ≤ 1	ELEVATO

Tab. 2 - Classi di variazione dell'Indice di ammaloramento complessivo.

5.2 L'Indice di Pericolosità (IPer)

L'introduzione dell'Indice di Pericolosità "IPer", nasce dall'esigenza di differenziare e di rendere prioritarie dal punto di vista degli interventi manutentivi quelle sezioni stradali che, pur avendo lo stesso IAC di altre, sono caratterizzate da una certa combinazione di caratteristiche sia geometriche che di traffico (quali ad esempio: una forte pendenza longitudinale negativa, la presenza di una curva, un elevato traffico orario, ecc.), tali da renderle potenzialmente più pericolose rispetto alle altre.

La procedura di definizione dell'indice di pericolosità richiede l'introduzione dei seguenti ulteriori indici:

- ⚡ IT = Indice di Traffico, finalizzato a quantificare numericamente l'influenza del traffico di ogni singola tratta, sull'analisi del rischio;
- ⚡ IA = Indice Altimetrico, che consente di tener conto del tipo di pendenza del profilo longitudinale (positiva o negativa) e dell'entità di tale pendenza (nel caso che essa sia negativa);
- ⚡ IPL = Indice Planimetrico, tramite il quale vengono assegnati pesi diversi a sezioni stradali con caratteristiche planimetriche differenti (curva, cloido o rettilineo);

- ↗ IC = Indice di Corsia, che consente di assegnare un peso maggiore alle sezioni presenti sulle corsie di sorpasso;
- ↗ IL = Indice di Lunghezza, introdotto per poter esprimere numericamente l'influenza dello sviluppo longitudinale delle singole sezioni stradali, le quali possono presentare lunghezze planimetriche tra loro differenti.

È importante far notare che nell'assegnazione dei vari pesi (PI) (ad ognuno degli indici appena definiti), si è tenuto conto della differente influenza che essi hanno nella determinazione delle condizioni di rischio.

Vediamo ora, singolarmente le varie procedure, necessarie per l'ottenimento degli indici sopra definiti.

5.2.1 L'Indice di Traffico (IT)

L'Indice di Traffico è un parametro che deve inglobare sia il grado di riempimento della sezione stradale oggetto di indagine, sia il fatto che in determinati tratti si può avere un sovraccarico veicolare.

L'utente che si trova a percorrere una strada è indotto ad adeguare la propria condotta di guida in funzione delle caratteristiche quali-quantitative del traffico veicolare; un repentino aumento della mole di traffico, ad esempio, provoca nel guidatore uno stato inconscio di insicurezza, mentre un traffico in rapido smaltimento tende a tranquilizzarlo.

Per tenere conto di quanto appena affermato, si è definito l'Indice di Traffico nel seguente modo:

$$IT_i = \frac{TO_{MAX}}{TO_{MED}}$$

dove:

- TO_{MAX} = traffico orario massimo in una determinata sezione stradale (individuato per un particolare intervallo orario);
- TO_{MED} = traffico orario medio lungo l'intera tratta (relativo allo stesso intervallo orario di TO_{MAX}).

E' evidente che quando il valore di TO_{MAX} in una sezione è maggiore del corrispondente valore di TO_{MED} , le condizioni di circolazione sono pessime; il contrario si verifica quando $TO_{MAX} < TO_{MED}$.

5.2.2 L'Indice Altimetrico (IA), l'Indice Planimetrico e l'Indice di Corsia

L'indice altimetrico consente di ponderare l'influenza che hanno il segno e l'entità della pendenza longitudinale di ogni singola sezione stradale sulla sicurezza del viaggio.

L'Indice Planimetrico è stato introdotto per stimare la caratteristica geometrica prevalente di ogni sezione (curva, cloide, rettifilo).

L'Indice di Corsia nasce dalla necessità di vagliare adeguatamente l'influenza dell'ammaloramento superficiale in funzione dell'ubicazione nella sezione trasversale della tratta in esame. E' infatti evidente che una situazione di grave ammaloramento lungo la corsia di sorpasso diventa particolarmente rischiosa, sia per le elevate velocità che possono essere raggiunte su tale corsia, sia per la pericolosità intrinseca nella manovra di sorpasso.

Pendenza Longitudinale	IA	Caratteristica Planimetrica	IPL	Tipologia di Corsia	IC
$PL \geq 0$	1	RETTIFILO	1	MARCIA	1
$-2.5 \leq PL < 0$	2.5	CLOTOIDE	2.5	SORPASSO	2.5
$-5 \leq PL < -2.5$	5	CURVA CIRCOLARE	5		

Tab. 3 - Valori dell'Indice altimetrico, planimetrico e di corsia.

Nella tabella 3 vengono riportati i valori attribuiti agli indici sopra definiti.

5.2.3 L'Indice di Lunghezza (IL)

L'introduzione dell'Indice di Lunghezza nasce dall'esigenza di mettere in conto la lunghezza caratteristica di ogni singola sezione stradale. In effetti, maggiore è lo sviluppo longitudinale di una sezione, maggiore è la probabilità che possa verificarsi un evento indesiderato; pertanto, se consideriamo come elemento unitario la sezione di lunghezza minima (SL_{min}), possiamo rapportare ad essa lo sviluppo di tutte le altre (SL_i).

L'Indice di Lunghezza si esprime nella maniera seguente:

$$IL_i = \frac{SL_i}{SL_{min}}$$

Tramite la valutazione degli indici IT, IPL, IA, IC, IL, siamo in grado di determinare l'Indice di Pericolosità (IPer) a mezzo della seguente relazione:

$$IPer_i = \frac{(IT_i \times PI^T + IA_i \times PI^A + IPL_i \times PI^P + IC_i \times PI^C + IL_i \times PI^L)}{(IT_{max} \times PI^T + IA_{max} \times PI^A + IPL_{max} \times PI^P + IC_{max} \times PI^C + IL_{max} \times PI^L)}$$

Riportiamo infine, nella tabella 4, il campo di variabilità dell'indice IPer ed il corrispondente livello di pericolosità.

INDICE DI PERICOLOSITÀ (IPer)	
INTERVALLO DI VARIAZIONE	LIVELLO DI PERICOLOSITÀ
$IPer = 0.19$	BASSO
$0.19 < IPer \leq 0.54$	MEDIO
$0.54 < IPer \leq 1$	ELEVATO

Tab. 4 - Classi di variazione dell'Indice di Pericolosità.

5.3 L'Indice di non funzionalità (I_{NF})

Con l'introduzione dell'Indice dell'ammaloramento complessivo (IAC) è stato realizzato uno strumento per individuare le sezioni più critiche dal punto di vista dell'entità dell'ammaloramento presente, mentre la definizione dell'IPer (indice di pericolosità), permette di assegnare pesi diversi alle influenze che le caratteristiche plano-altimetriche e di traffico della tratta in esame hanno sull'entità del danno.

Sostanzialmente, dunque, ci ritroviamo, a disposizione, due strumenti, che se usati separatamente, ci permettono l'individuazione di due tipologie concettualmente differenti di sezioni critiche. Infatti, se si analizzassero simultaneamente i grafici relativi all'indice dell'ammaloramento complessivo e quelli inerenti all'indice della pericolosità, si potrebbe riscontrare la presenza di alcune sezioni che, pur essendo caratterizzate da un elevato ammaloramento complessivo, presentano bassi indici di pericolosità; al contrario, potrebbero essere presenti sezioni che, pur avendo un indice di pericolosità abbastanza elevato, sono caratterizzate da un basso ammaloramento. L'esempio applicativo svolto nel paragrafo successivo non fa che confermare quanto appena affermato.

Dalle considerazioni svolte, si intuisce che i due "indici" devono essere usati contemporaneamente, se si vuole ottenere una definizione univoca della criticità di una determinata tratta stradale.

Ricordiamo infatti che la metodologia dell'analisi del rischio, ha come scopo finale l'individuazione dell'entità del rischio presente sull'infrastruttura in esame.

Si ritiene opportuno che l'ente gestore di una determinata infrastruttura abbia a disposizione un unico strumento che gli

permetta di decidere (in funzione dei limiti di budget a sua disposizione), su quali sezioni sarà necessario intervenire in modo tempestivo, ed in quali invece, pur essendo presente un certo grado di ammaloramento, il rischio che le caratterizza è ancora accettabile.

A tal fine si è introdotto il cosiddetto Indice di non funzionalità (I_{NF}), così definito:

$$I_{NF} = \frac{IAC_1 \times IPer_1}{IAC_{max} \times IPer_{max}}$$

Nella tabella 5 sono visualizzate le classi di variazione dell'Indice di non funzionalità.

INDICE DI NON FUNZIONALITA' (I_{NF})	
INTERVALLO DI VARIAZIONE	LIVELLO DI RISCHIO
$I_{NF} = 0$	NULLO
$0 < I_{NF} \leq 0.06$	NORMALE
$0.06 < I_{NF} \leq 0.35$	CONDIZIONANTE
$0.35 < I_{NF} < 1$	ECCEZIONALE
$I_{NF} = 1$	ESTREMO

Tab. 5 - Classi di variazione dell'Indice di non funzionalità.

5.4 L'Indice di Efficienza Globale (I.E.G.)

La gestione di una qualsiasi infrastruttura comporta una serie complessa di operazioni necessarie a garantirne la funzionalità per un determinato intervallo di tempo.

Una qualunque operazione manutentiva rappresenta un impegno finanziario che va sempre confrontato con il budget disponibile.

Il gestore dell'infrastruttura si trova spesso nelle condizioni di dovere operare una scelta tra le varie tipologie di intervento possibile, dovendo affrontare il tipico problema della "razionalizzazione del capitale", cioè impiegare il capitale disponibile in modo da ottenere il massimo beneficio.

Per fare questo occorre analizzare i punti critici del sistema, ipotizzare mediante leggi di degrado i possibili scenari futuri e scegliere quegli interventi che massimizzino la funzionalità dell'opera.

Nei casi in cui la disponibilità finanziaria non permetta di intervenire sul risanamento di tutti i tratti ammalorati, la scelta su dove intervenire non è più univocamente determinata. A tale riguardo risulta indispensabile introdurre un indice che permetta di valutare l'"efficienza" dell'infrastruttura e di assegnare delle priorità di intervento strettamente correlate con la sicurezza di viaggio.

Tale indice è stato definito col termine di "Indice di Efficienza Globale", ed è dato dalla seguente formula:

$$IEG_{strada} = \frac{S.L.C. - \sum_{i=1}^N (I_{NF_i} \cdot SL_i)}{S.L.C.}$$

dove :

- S.L.C. = sviluppo longitudinale dell'intera strada ;
- N = numero di tratte individuate sulla strada;
- I_{NF_i} = valore dell'indice di non funzionalità della generica tratta i-esima;
- SL_i = sviluppo longitudinale della generica tratta i-esima.

Con tale indice si riesce a dare una valenza superiore a quelle sezioni caratterizzate da un "peso" maggiore nella determinazione del grado di sicurezza di viaggio.

Il campo di esistenza dell'indice (IEG) ricade nell'intervallo [0,1]; la tabella 6 evidenzia i diversi intervalli di variabilità di tale indice, in funzione dell'efficienza globale.

INDICE DI EFFICIENZA GLOBALE (I.E.G.)	
INTERVALLO DI VARIAZIONE	CLASSE DI EFFICIENZA
$IEG = 0$	NULLA
$0 < IEG \leq 0.60$	BASSA
$0.60 < IEG \leq 0.80$	MEDIA
$0.80 < IEG \leq 1$	ELEVATA
$IEG = 1$	MASSIMA

Tab. 6 - Classi di variazione dell'Indice di Efficienza Globale.

6. ESEMPIO APPLICATIVO DELLA PROCEDURA DI INDAGINE PROPOSTA

Per comprendere meglio la metodologia esposta nel precedente paragrafo, si è pensato di svolgere un esempio applicativo. Ci si è pertanto riferiti alla Tangenziale Ovest di Catania (Fig. 2).

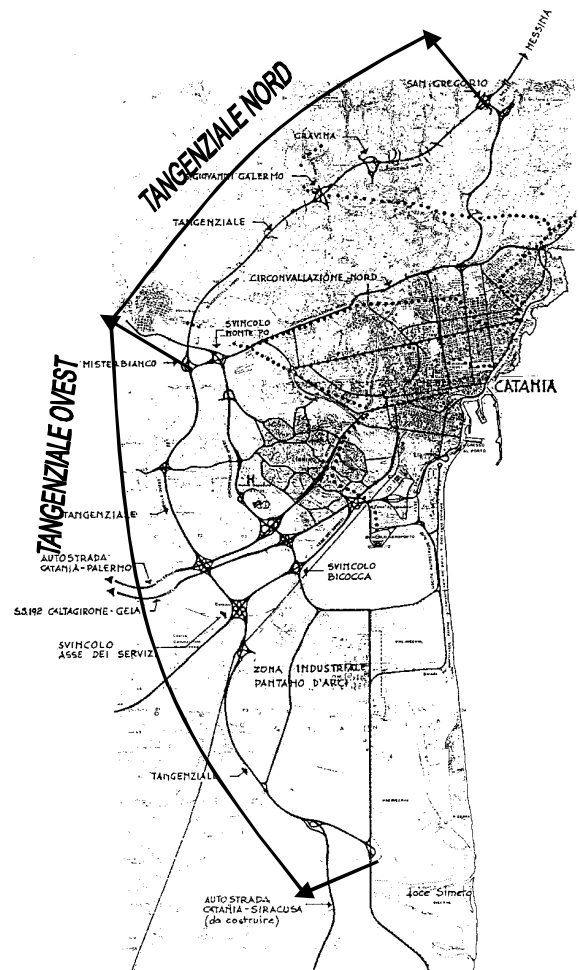


Fig. 2 - La Tangenziale di Catania.

La Tangenziale di Catania è un'infrastruttura viaria, con caratteristiche autostradali, preposta al collegamento fra le aree periferiche e le aree industriali. Si deve purtroppo rilevare

come tale infrastruttura, a partire dalla sua realizzazione (1980) fino ad oggi, non abbia subito un programma manutentivo idoneo. Gli interventi manutentivi eseguiti si sono limitati esclusivamente alla eliminazione dello "stato di pericolo".

Nell'anno 1994 è stato portato a termine un tratto di strada, denominato Tangenziale Nord, che innestandosi nella Tangenziale Ovest, la collega con il tratto terminale dell'Autostrada A18.

Lungo la Tangenziale, il traffico veicolare risulta principalmente composto da autovetture che usano l'infrastruttura per il percorso "casa-lavoro" e da mezzi pesanti in penetrazione verso la zona industriale.

I grafici riportati nelle figure 3 e 4, sono indicativi del traffico gravante sulla Tangenziale; in particolare, si è scelto di omogeneizzare le varie classi veicolari in veicoli equivalenti, mediante l'adozione di opportuni coefficienti di equivalenza.

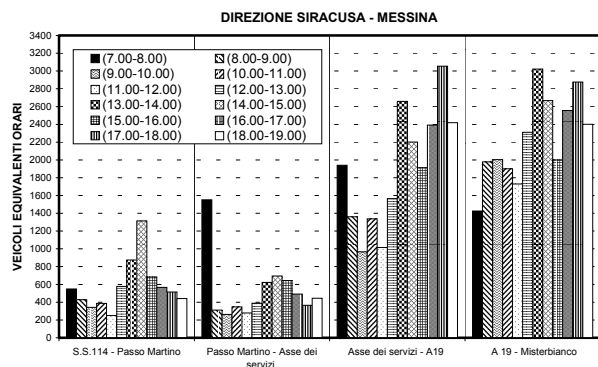


Fig. 3 - Veicoli equivalenti sulla Tangenziale di Catania. (direzione SR - ME).

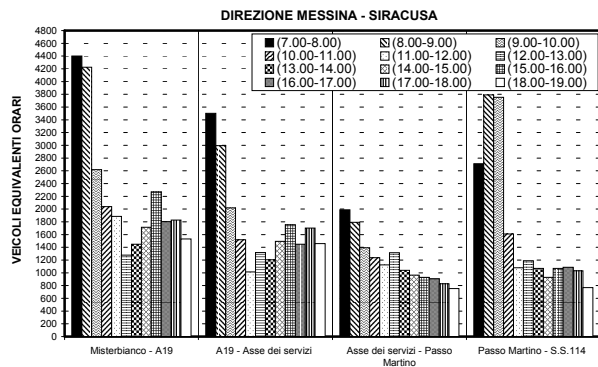


Fig. 4 - Veicoli equivalenti sulla Tangenziale di Catania. (direzione ME - SR).

Nell'ambito di questa ricerca si è potuto usufruire di una "banca-dati" contenente le seguenti informazioni:

- ⇒ I risultati puntuali delle prove F.W.D.; (rilevati ogni 100 metri di strada, per entrambe le direzioni di marcia, con il relativo calcolo dei moduli elastici dei diversi strati della pavimentazione).
- ⇒ I valori dell'indice di regolarità I.R.I. (International Roughness Index); (rilevati ogni 25 metri).
- ⇒ I valori del coefficiente di aderenza C.A.T.; (per ogni 50 metri di strada, rilevati con l'apparecchiatura SCRIM).

⇒ I valori dell'indice di ammaloramento superficiale; (ottenuti per ogni 25 metri di pavimentazione con lo strumento Dynatest-SURVEY).

⇒ I valori delle irregolarità superficiali; (ottenuti con il Profilometro Laser, per ogni 25 metri di sezione stradale suddivisi in irregolarità per onde corte e medie, variazioni di pendenza trasversale, altezza delle ormaie, raggio di curvatura).

Mediante l'elaborazione dei dati raccolti, sono state identificate 21 sezioni omogenee per la carreggiata Siracusa-Messina e 27 sezioni omogenee per la carreggiata Messina-Siracusa.

Ricordiamo che le sezioni omogenee sono quei tratti stradali in cui si può supporre che i parametri caratteristici (portanza, regolarità, rugosità) siano costanti lungo tutto il loro sviluppo.

Queste sezioni sono state scelte come riferimento per la valutazione degli indici di efficienza.

Dai rilievi effettuati sulla Tangenziale, mediante l'utilizzo di un software di Pavement Management System (PMS), sono stati individuati i valori di ammaloramento per le quattro tratte in esame (due per senso di marcia), mediante degli indici che identificano le diverse classi di degrado (Tab. 7).

PORTANZA	ADERENZA	REGOLARITA'	DEGRADO
Rinforzo < 10	C.A.T. > 60	I.R.I. < 2.5	NULLO
10 < Rinforzo < 35	35 < C.A.T. < 40	2.5 < I.R.I. < 3.75	BASSO
35 < Rinforzo < 60	30 < C.A.T. < 35	3.75 < I.R.I. < 5.0	MEDIO
Rinforzo > 60	C.A.T. < 30	I.R.I. > 5.00	ELEVATO

Tab. 7 - Classi di degrado per i tre indicatori di stato (portanza, aderenza, regolarità).

Tenendo conto delle classi di degrado dei tre indicatori di stato e dei dati a nostra disposizione, è possibile svolgere le seguenti osservazioni:

- ⇒ la Tangenziale di Catania è interessata da diffusi problemi di portanza sulle corsie di marcia di entrambe le direzioni;
- ⇒ la regolarità dei profili longitudinali è nel complesso insoddisfacente, soprattutto nelle corsie di marcia di entrambe le direzioni;
- ⇒ il Coefficiente di Aderenza Trasversale (C.A.T.), specialmente per quanto riguarda le corsie di sorpasso, è nel complesso soddisfacente, eccezion fatta per i primi 6 chilometri della corsia di marcia (nella direzione SR-ME), nella quale sono stati riscontrati valori del C.A.T. minori di 30.

Avendo a disposizione sia i dati ammaloramento che quelli relativi alle caratteristiche geometriche e di traffico della Tangenziale, è possibile avviare l'iter procedurale elaborato.

In sintesi:

- 1) calcolo dell'indice di ammaloramento complessivo (IAC) (Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8);
- 2) valutazione dell'indice di pericolosità (IPer) (Fig. 9, Fig. 10);
- 3) calcolo dell'indice di non funzionalità (I_{NF}) (Fig. 11, Fig. 12);
- 4) valutazione dell'indice di efficienza globale (IEG).

L'applicazione della metodologia proposta è culminata nella determinazione, per l'infrastruttura in esame, di un indice di efficienza globale (IEG) pari a 0.72 con il quale si identifica una classe di efficienza Media (Tab. 6).

Il motivo di questo valore relativamente alto dell'efficienza globale è da ricercarsi nel fatto che i valori di ammaloramento maggiori si sono riscontrati sulle corsie di marcia (le quali sono caratterizzate da indici di pericolosità minori, rispetto alle corsie di sorpasso).

Inoltre si deve notare che l'indicatore di stato rappresentativo delle peggiori condizioni di ammaloramento è la portanza, al quale è stato assegnato il minor peso nei confronti della "sicurezza".

Infine, per quando riguarda l'aderenza superficiale, si può sostenere che essa presenta nel complesso un grado di ammaloramento basso.

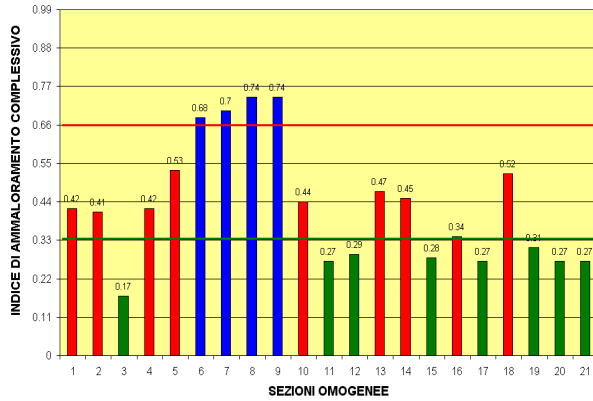


Fig. 5 - Valori dell'Indice I.A.C. per la corsia di marcia della Tangenziale (Direzione SR - ME).

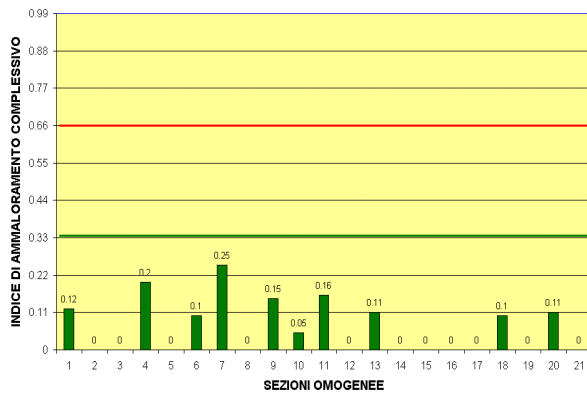


Fig. 6 - Valori dell'Indice I.A.C. per la corsia di sorpasso della Tangenziale (Direzione SR - ME).

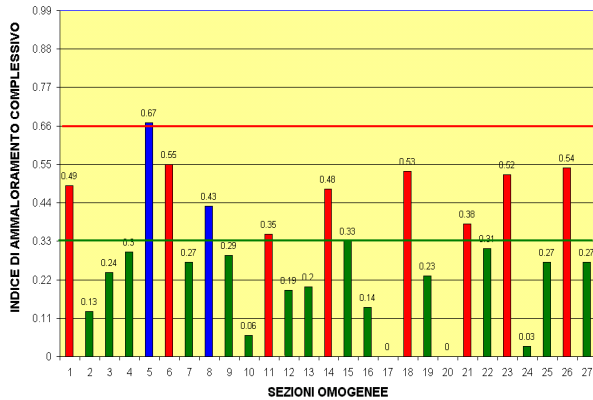


Fig. 7 - Valori dell'Indice I.A.C. per la corsia di marcia della Tangenziale (Direzione ME - SR).

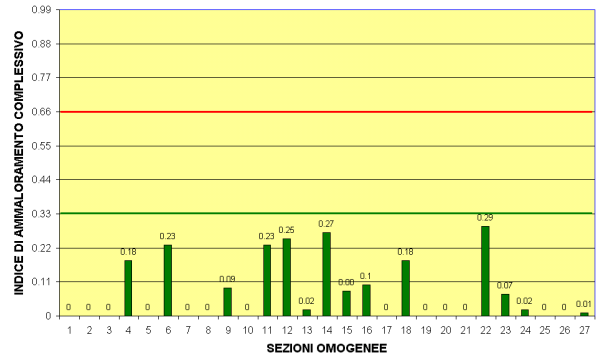


Fig. 8 - Valori dell'Indice I.A.C. per la corsia di sorpasso della Tangenziale (Direzione ME - SR).

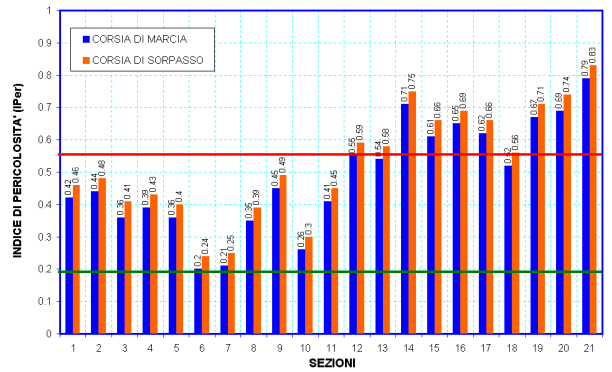


Fig. 9 - Valori dell'Indice IPer per le corsie di marcia e sorpasso della Tangenziale (SR - ME).

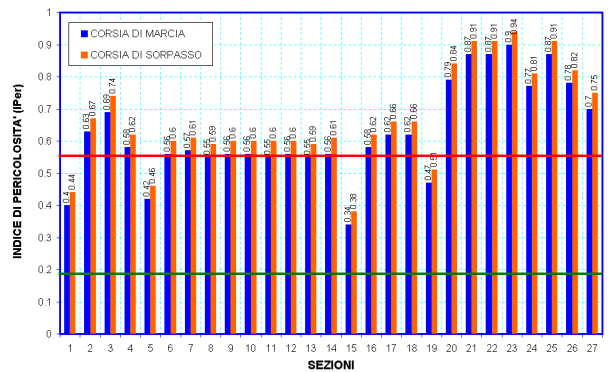


Fig. 10 - Valori dell'Indice IPer per le corsie di marcia e sorpasso della Tangenziale (ME - SR).

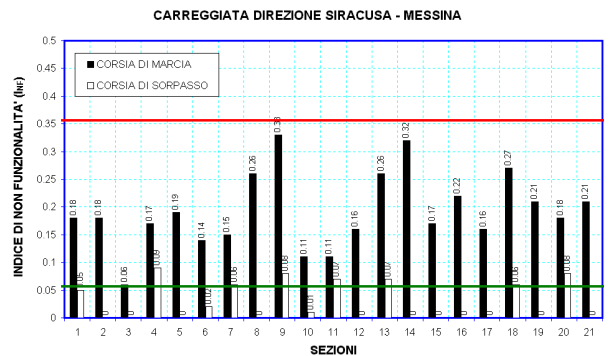


Fig. 11 - Valori dell'Indice di non funzionalità per le corsie di marcia e sorpasso (SR - ME).

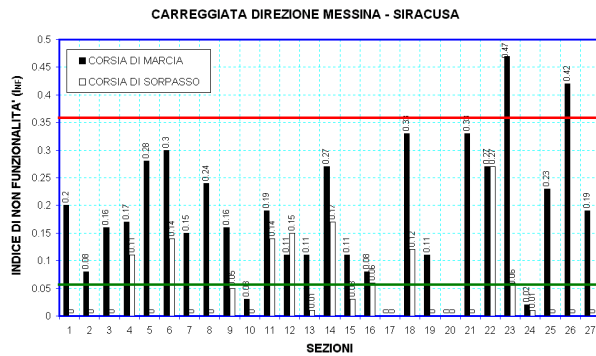


Fig. 12 - Valori dell'Indice di non funzionalità per le corsie di marcia e sorpasso (ME - SR).

7. APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA ELABORATA PER LA PROGRAMMAZIONE DEGLI INTERVENTI MANUTENTIVI

Spesso i programmi di manutenzione vengono limitati dalla scarsità delle risorse finanziarie effettivamente disponibili; mediante la metodologia elaborata, è possibile programmare gli interventi manutentivi in modo da massimizzare l'efficienza globale dell'infrastruttura.

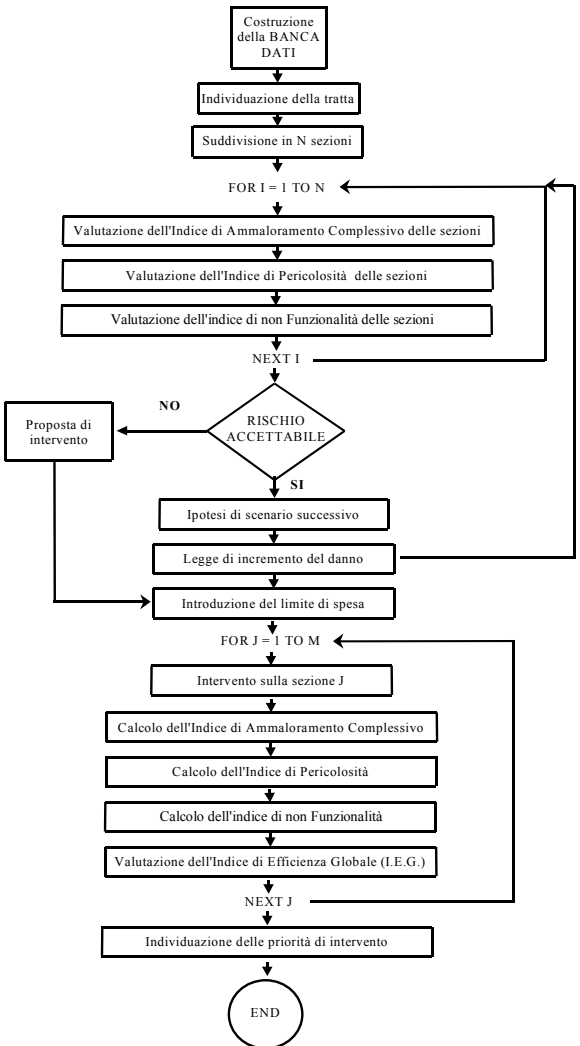


Fig. 13 - Flow Chart della metodologia di analisi elaborata.

Volendo fare uno screening delle fasi procedurali, possiamo far riferimento al seguente iter:

- si fissano i limiti finanziari disponibili per le opere di manutenzione;
- si ipotizzano vari scenari caratterizzati dalla esecuzione di interventi manutentivi diversi in differenti sezioni, ma di uguale costo;
- si calcola, per ogni ipotesi di intervento il valore dell'indice di Efficienza Globale della strada;
- raggruppando in un diagramma i valori degli indici di Efficienza Globale dei differenti scenari di intervento, si può elaborare una scala delle priorità di scenario di intervento, in funzione del budget disponibile.

Le operazioni da eseguire vengono rappresentate nel diagramma di flusso di Fig. 13.

Nel "caso" della Tangenziale, si vede chiaramente (Fig. 12) che gli interventi immediati devono essere eseguiti in quelle zone che hanno un indice di non funzionalità maggiore di 0.35 (livello di rischio eccezionale).

Volendo continuare ad investire in "manutenzione", non risulta univocamente determinato dove "investire".

Se si ipotizza un valore di budget disponibile, si è in grado di individuare diverse tipologie di opere manutentive applicabili alle varie sezioni degradate.

Identificando ogni operazione manutentiva con uno "scenario", è possibile costruire il diagramma di figura 14, dove vengono messi in relazione il valore dell'IEG (ottenuto dopo l'esecuzione delle opere di manutenzione) ed i relativi scenari.

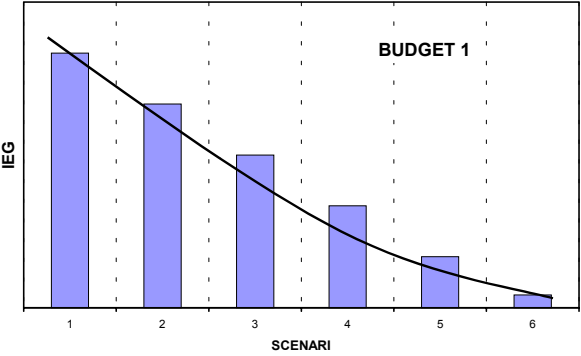


Fig. 14 – Diagramma qualitativo dell'efficienza in funzione dei diversi scenari ipotizzabili.

In questo modo è possibile determinare, fissato un valore di budget disponibile, lo "scenario" manutentivo che massimizzi il valore dell'Indice di Efficienza Globale.

Analogamente, tale metodologia potrebbe essere utilizzata anche per le fasi di programmazione finanziaria del budget; infatti, ipotizzando diversi valori del budget, per ognuno di essi si può ricavare un diagramma qualitativamente simile a quello di figura 14, indicativo dei valori dell'indice di efficienza globale associati ai diversi scenari proponibili per uno stesso budget.

Ripetendo la stessa indagine per differenti valori di budget, risulta fattibile graficizzare (Fig. 15) i valori di efficienza massima (IEG_M) in funzione del budget corrispondente.

Introducendo, nel diagramma di figura 15, il valore minimo dell'Indice di Efficienza Globale che si vuole mantenere nell'infrastruttura, possiamo determinare l'onere finanziario necessario per le opere di manutenzione. Analogamente, partendo dal valore del budget a disposizione, è possibile ricavare l'IEG effettivamente ottenibile.

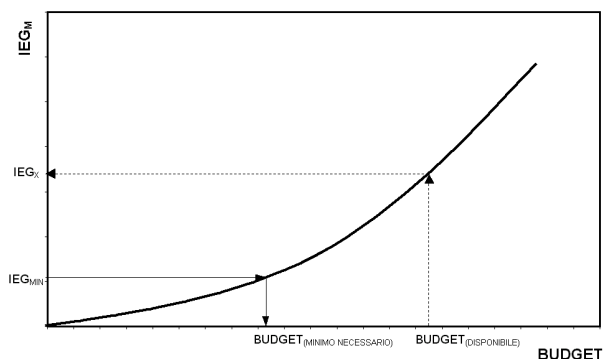


Fig. 15 – Diagramma qualitativo Efficienza/Budget.

8. CONCLUSIONI

Una qualunque infrastruttura deve essere intesa come un meccanismo che, per avere un ottimo funzionamento, deve essere in ogni sua parte “efficiente”. L’efficienza secondo un’ottica moderna deve essere valutata sia dal punto di vista tecnico, ossia riguardo alla massima funzionalità, che dal punto di vista economico-finanziario, garantendo le massime prestazioni con il minimo costo.

In questa memoria abbiamo voluto far notare che la valutazione dell’efficienza di una infrastruttura stradale, si può basare su una metodologia in cui possono essere introdotti termini che tengono conto, rispettivamente, del tipo di danno, dell’entità di esso e della sua incidenza lungo la superficie della strada.

Se la scelta del momento in cui intervenire e delle zone dove intervenire non risulta univocamente determinata, essa può essere fatta mediante l’uso della metodologia dell’analisi del rischio, la quale consente anche di stabilire una scala di priorità degli interventi collegata con la sicurezza della percorribilità stradale.

Si sottolinea infine che mediante l’uso di procedure informatizzate è possibile individuare quale deve essere il budget minimo da inserire in bilancio affinché venga garantito il minimo livello di rischio e quindi una maggiore efficienza della tratta presa in esame.

BIBLIOGRAFIA

- 1) C.N.R. "Norme tecniche - Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale" - B.U. 125/88.
- 2) RO.DE.CO; "The RO.MA. Road Evaluation and Pavement Management System" - 1990
- 3) "Nuovo Codice della Strada" - Ed. Simone - 1993
- 4) M. Agostinacchio, R. Bernetti, M. Diomedì; "Analisi delle caratteristiche superficiali di aderenza e regolarità delle sovrastrutture stradali urbane mediante definizione di un indice di efficienza globale (I.E.G.)" - Atti della Giornata di Studio sul tema: Sicurezza intrinseca delle infrastrutture stradali - Roma - 20/21 Febbraio 1997.
- 5) G. Battiato, B. K. Larsen; "La pianificazione della manutenzione stradale mediante il sistema RO.MA." - Atti del XXI Convegno Nazionale Stradale - Trieste - Giugno 1990.
- 6) V. Bettini, F. Falqui, M. Alberti; "Il bilancio di impatto ambientale" - Ed. CLUP - 1986.
- 7) G. Boscaïno; "La manutenzione programmata della rete viaria" - Giornata di studio - Cagliari - Aprile 1990.

- 8) G. Boscaïno; "La manutenzione delle pavimentazioni stradali" - Giornata di studio - Agrigento - 2/1991
- 9) G. Camomilla, E. Boccato; "La manutenzione programmata" - Riv. Autostrade - Dicembre 1983.
- 10) G. Camomilla, M. Malgarini; "Nuovi metodi per la misura della capacità portante della pavimentazione" - Riv. Autostrade - Maggio 1983.
- 11) G. Camomilla, M. Malgarini; "La misura della regolarità delle pavimentazioni" - Riv. Autostrade - Luglio-Agosto 1987.
- 12) S. Canale, F. Nicosia, S. Leonardi; "Metodologia di verifica delle curve circolari in base all'analisi del rischio" - Riv. Autostrade - Anno XXXVIII - N. 1 - Gennaio-Marzo 1996.
- 13) S. Canale, S. Leonardi, F. Nicosia; "Analisi critica del fenomeno dell'aderenza in campo stradale e ferroviario" - Quaderno N. 88 - Istituto di Strade Ferrovie ed Aeroporti - Catania - Settembre 1996.
- 14) M. Donata, G. Battiato; "Confronti e valutazioni tecnico-economiche delle diverse strategie di manutenzione delle sovrastrutture stradali sulla rete delle Autovie venete" - Atti del XXI Convegno Nazionale Stradale - Trieste - Giugno 1990.
- 15) F. Giannini, L. Domenichini, A. Marchionna; "Manutenzione e dimensionamento delle sovrastrutture stradali" - Atti del XIX Convegno Nazionale Stradale - Rimini - Giugno 1982.
- 16) D. Giombi, M.T. Lucarelli, F. Terranova; "Igiene ambientale" - Ed. NIS - 1993.
- 17) G. Peroni; "Manutenzione delle pavimentazioni: sviluppo dei criteri gestionali" - Riv. Autostrade - Ottobre 1987.
- 18) G. Rouques, J. Lucas; "Méthodes modernes de surveillance du réseau routier" - Revue générale des routes et aérodromes - Agosto 1975.
- 19) A. Zeppetella, M. Bresso, G. Gamba; "Valutazione ambientale e processi di decisione" - Ed. NIS - 1992.