



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

**MODELLAZIONE MATEMATICA DELLE ATTIVITÀ DI MANUTENZIONE E  
RISANAMENTO STRADALE**

**MATHEMATICAL MODELING OF ROAD MAINTENANCE AND REHABILITATION  
ACTIVITIES**

Relatrice:

Prof. ssa **Ornella Pisacane**

Tesi di Laurea di:

**Alessandro Properzi 1096576**

**A.A. 2023 / 2024**

## **Ringraziamenti**

Vorrei dedicare questo spazio dell'elaborato alle persone che hanno contribuito alla realizzazione dello stesso.

Un doveroso ringraziamento va alla mia relatrice Pisacane Ornella, che con la sua immensa pazienza, mi ha seguito con infinita disponibilità nella stesura del seguente elaborato.

Ringrazio i miei genitori che mi hanno permesso di arrivare fin qui, perché senza di loro non avrei potuto intraprendere questo percorso di studi.

Grazie ai miei amici e colleghi di corso, per avermi sempre incoraggiato soprattutto nei momenti più difficili.

**Alessandro Properzi**

# Sommario

<b>Sommario</b> .....	<b>2</b>
<b>Indice delle tabelle</b> .....	<b>4</b>
<b>Indice delle figure</b> .....	<b>4</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>5</b>
<b>Capitolo 1</b> .....	<b>6</b>
1.1 Introduzione .....	6
1.3 Obiettivi .....	7
1.4 Struttura della tesi.....	7
<b>Capitolo 2</b> .....	<b>8</b>
2.1 Introduzione al tema e descrizione del caso.....	8
2.2 Preservazione del manto stradale .....	8
2.3 Gli effetti dei cantieri sulla viabilità .....	9
2.4 Strategia di manutenzione e riparazione della pavimentazione .....	10
<b>Capitolo 3</b> .....	<b>11</b>
<b>3.1 Descrizione del caso</b> .....	<b>11</b>
<b>3.2 Formulazione del modello</b> .....	<b>13</b>
Insiemi e parametri .....	13
Variabili.....	14
Indici .....	14
Funzione obiettivo.....	14
Vincoli .....	14
<b>Capitolo 4</b> .....	<b>18</b>
4.1 Introduzione.....	18
4.2 Descrizione delle istanze .....	18
4.3 Risultati computazionali .....	19

Validazione della formulazione matematica proposta su istanze di piccole dimensioni.....	19
Analisi di sensitività: budget.....	6
Analisi di sensitività: numero periodi.....	8
Analisi di sensitività: numero di segmenti.....	9
Analisi di sensitività: variazione $Z$ .....	10
<b>Capitolo 5 .....</b>	<b>13</b>
Conclusioni e sviluppi futuri .....	13
<b>Riferimenti Bibliografici .....</b>	<b>15</b>

## Indice delle tabelle

Tabella 1: Pratiche per la manutenzione e la riabilitazione del manto stradale (adapted from Geoffroy and Shufon (1922) [7]).....	12
Tabella 2. Tabella riassuntiva operazioni M&R (adapted from Geoffroy and Shufon (1922) [7]). .....	12
Tabella 3 - Programmazione attività M&R con $\alpha$ pari a 2. ....	19
Tabella 4 - Programmazione attività M&R con $\alpha$ pari a 3. ....	1
Tabella 5 - Programmazione attività M&R con $\alpha$ pari a 3 (40 segmenti) .....	2
Tabella 6 - Programmazione attività M&R con $\alpha$ pari a 2 (40 segmenti).....	3
Tabella 7 – Variazione Budget .....	7
Tabella 8 – Variazione numero di periodi .....	8
Tabella 9 - Variazione n. di Segmenti.....	9
Tabella 10 – Variazione $Z$ istanza n.1 .....	10
Tabella 11 – Andamento condizioni medie istanza n.1.....	10
Tabella 12 - risultati analisi al variare di $Z$ istanza n.2 .....	11

## Indice delle figure

Figura 1 – Andamento condizioni medie al variare di $\alpha$ (40 segmenti).....	5
Figura 2 – grafico andamento condizioni medie della pavimentazione stradale. ....	6
Figura 3 – Andamento $Z'$ istanza n.2 .....	12

## Abstract

Il problema affrontato in questo lavoro di tesi riguarda la programmazione e la schedulazione delle attività di manutenzione sul manto stradale, considerando un orizzonte di pianificazione definito. Il problema è inoltre affrontato considerando l'aspetto legato alla congestione del traffico, dovuta all'apertura di cantieri in posti anche abbastanza attigui.

Il problema affrontato riveste un'importanza cruciale visto che una rete stradale, che opera in scarse condizioni di servizio, provoca un aumento dei costi logistici. Inoltre, un'indiscriminata dislocazione dei cantieri stradali provoca svariati disagi, tra cui un aumento delle emissioni ed una scarsa sicurezza stradale.

Dopo un'attenta disamina della letteratura, il problema in esame è stato modellato matematicamente, discretizzando l'orizzonte di pianificazione in periodi, ciascuno di uguale lunghezza e dividendo il tratto stradale da mantenere in segmenti, massimizzando un indice di affidabilità della strada. Questo indice tiene in conto le diverse attività di manutenzione selezionate, nei vari periodi, per i vari segmenti. L'aspetto innovativo, introdotto nella formulazione proposta, è la modellazione di un insieme di vincoli per tenere in conto il fatto che non è possibile selezionare segmenti attigui per la manutenzione nello stesso periodo di tempo.

Il modello è stato implementato in Python e risolto tramite le API di Cplex. È stata quindi condotta una campagna sperimentale ed anche un'analisi di sensitività al variare dei parametri di input del modello più significativi.

# Capitolo 1

## 1.1 Introduzione

Una rete stradale in cui la pavimentazione si trova in povere condizioni può provocare un aumento dei costi di gestione del trasporto. Di conseguenza, è necessario mantenere la rete stradale per poterle garantire le migliori condizioni possibili, tenendo conto dell'esigenza di gestire al meglio le risorse, spesso molto limitate, a disposizione. Per evitare un eccessivo aumento dei costi imputabili alla manutenzione stradale, è necessaria una programmazione delle attività di riparazione e manutenzione, che tenga conto dell'onerosità delle diverse operazioni durante un certo arco temporale, in cui inoltre si tenga anche conto del deterioramento del manto stradale. Un altro aspetto che dovrà essere considerato è l'ipotetica congestione stradale data dalla troncatura di uno o più segmenti stradali per le attività di riabilitazione [1]. Infatti, oltre a causare un peggioramento della viabilità stradale, l'apertura di eccessivi cantieri può risultare essa stessa una causa degli aumenti dei costi logistici. Quindi la schedulazione delle attività di manutenzione e riparazione del manto stradale oltre a garantire la massima qualità possibile della rete, rispettando le restrizioni economiche, deve anche tener conto della dislocazione delle operazioni di risanamento stradale, in modo tale da ridurre la congestione. Obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di affrontare il problema di programmazione e schedulazione delle attività di manutenzione stradale, per massimizzare l'affidabilità della rete, considerando vincoli sul budget disponibile e sulla congestione del traffico. Tale problema è affrontato con le tecniche proprie dell'ottimizzazione matematica. In particolare, si propone un modello di Programmazione Lineare Intera Mista, risolto mediante il risolutore commerciale Cplex.

In particolare, il problema è ricondotto a quello di stabilire, segmento per segmento, quali attività pianificare e come schedularle (considerando il deterioramento della rete stradale nel corso del tempo).

Analizzando lo stato dell'arte, è stato individuato un modello di programmazione matematica, proposto in [3], con caratteristiche relativamente semplici, formulato per programmare in maniera efficiente le attività di manutenzione sotto vincoli di budget e per tale ragione, sarà il punto di partenza per questo lavoro di tesi.

## **1.3 Obiettivi**

Tra gli obiettivi principali della tesi, sicuramente riveste un ruolo principale la formulazione matematica del problema di programmazione e schedulazione delle attività di manutenzione sul manto stradale. Inoltre, ulteriore obiettivo è quello dell'analisi e della validazione del modello proposto anche mediante una campagna sperimentale.

## **1.4 Struttura della tesi**

Nel secondo capitolo verrà presentata la disamina della letteratura con riferimento all'argomento affrontato nella tesi.

Successivamente, nel terzo capitolo, verrà descritto il modello matematico proposto.

Nel quarto capitolo, verranno mostrati i risultati computazionali, con la validazione del modello matematico e vari casi applicativi.

Nell'ultimo capitolo, sarà proposta una discussione dei risultati ottenuti e degli obiettivi raggiunti, concludendo con una valutazione su come il lavoro svolto può proseguire.

## Capitolo 2

### 2.1 Introduzione al tema e descrizione del caso

Il problema del Pavement Maintenance Problem, o problema della manutenzione del manto stradale (PMP), è principalmente incentrato sulla pianificazione strategica del risanamento di una rete stradale, dove lo scopo può variare considerevolmente, data la sua complicata natura. Ad esempio, una delle preoccupazioni principali potrebbe riguardare l'impatto ambientale [6] oppure più semplicemente l'abbattimento dei costi della programmazione delle attività di manutenzione e riparazione (M&R) [3].

Il PMP solitamente deve gestire risorse limitate durante un orizzonte temporale di svariati anni (lungo periodo 5-15 anni). Un altro aspetto cruciale è il mantenimento o preservazione della prestazione del manto stradale, il mantenimento può consistere in operazioni di riparazione mirate ad un specifico aspetto della pavimentazione [4], oppure in una pianificazione delle attività affinché sia garantito un certo standard di qualità della rete[3].

In questo caso, l'attenzione ricade fundamentalmente sulla riduzione dei costi di trasporto, che sono strettamente influenzati dalle condizioni della rete stradale, sia da un punto di vista qualitativo del manto che del livello di viabilità dei mezzi nella rete. Infatti, sarà essenziale considerare anche la dislocazione dei cantieri stradali, che sicuramente avranno degli effetti negativi che dovranno esser presi in considerazione durante la modellazione matematica.

### 2.2 Preservazione del manto stradale

La preservazione del manto stradale consiste in una strategia proattiva di manutenzione e riparazione con l'obiettivo di estendere la durata e la funzionalità della rete stradale [2]. Questa strategia ricorre ad una serie di attività di diverso tipo, con l'obiettivo di evitare o comunque rallentare il deterioramento della pavimentazione.

Le azioni a cui facciamo riferimento includono quelle di routine, trattamenti di risanamento superficiale, e riparazioni più estensive nelle più peggiori delle situazioni. Tra i vantaggi ottenuti, c'è la garanzia di una migliore sicurezza stradale, migliore sostenibilità delle infrastrutture ed un'ulteriore efficienza dei costi per via delle regolari azioni di minor impatto, che servono ad evitare di dover fare ricorso ad attività più onerose e distruttive di riabilitazione e ricostruzione.

Quindi, con la preservazione del manto stradale, cerchiamo di contrastare il degrado della pavimentazione anche quando iniziano a manifestarsi problemi di minore entità,

prima che tali problemi diventino troppo costosi da risolvere. Per questo motivo, è essenziale una programmazione.

## 2.3 Gli effetti dei cantieri sulla viabilità

Tra la congestione dei flussi di traffico e l'apertura dei cantieri esiste una stretta correlazione, le interruzioni temporanee dei tratti stradali per via dei lavori di risanamento provocano dei cambiamenti nell'efficienza della viabilità stradale. Infatti, nel lavoro di [1], l'apertura di un cantiere stradale, oltre a provocare una perdita di viabilità del flusso di traffico, causa anche:

- Una diminuzione dei livelli di sicurezza;
- Maggiore stress psico-fisico dei viaggiatori;
- Incremento delle emissioni.

Quindi, l'apertura di più cantieri stradali consecutivi, in cui più progetti di risanamento, manutenzione e ricostruzione sono in corso uno vicino all'altro, possono creare la serie di problemi appena descritti tra cui una maggiore congestione stradale.

Detto ciò, è fondamentale anche considerare la dislocazione dei cantieri stradali, affinché si possa pensare ad una programmazione delle attività di M&R che realmente vada a mitigare il costo delle attività di trasporto.

## 2.4 Strategia di manutenzione e riparazione della pavimentazione

Il lavoro [3] propone un modello di Programmazione Lineare Intera PLI che si basa sulla definizione di un indice di performance che descrive la qualità del manto stradale, che varia in base ad una funzione di degrado annuale, dove la funzione obiettivo ha lo scopo di massimizzare le condizioni della rete stradale. Inoltre, il modello proposto ha a disposizione una serie ben definita di azioni dedite al risanamento stradale, in un orizzonte di pianificazione prestabilito, in cui per ogni segmento stradale deve essere garantito un certo livello di qualità.

Il problema della programmazione delle attività di manutenzione e riparazione del manto stradale è stato trattato anche in [4], in riferimento alla rete stradale di Taiwan; l'obiettivo del modello è incentrato sulla minimizzazione della durata complessiva del progetto di risanamento, determinata dalla sommatoria delle attività di riparazione

Un altro obiettivo consiste nel gestire in particolare la riparazione delle buche nella rete stradale, causate dalle forti piogge Taiwanesi, risolvendo un problema di schedulazione delle attività con risorse vincolate.

Un altro caso di studio è quello di [5], dove vengono proposti diversi modelli di ottimizzazione matematica, i quali cercano di diminuire in funzione obiettivo un indice standard di "rugosità" internazionale della pavimentazione stradale, valutando diversi tipi strategie comunemente usate, ovvero: optimization-based strategy (OPT), worst-first (WF), best-first (BF), threshold-based (THR). Gli autori concludono che la strategia optimization-based strategy (OPT) sia maggiormente performante.

## Capitolo 3

### 3.1 Descrizione del caso

Avendo la necessità di mantenere la rete stradale nelle migliori condizioni possibili, cercando di evitare che i cantieri possano influenzare negativamente la viabilità, sono state assunte le seguenti ipotesi:

- La rete stradale è suddivisa in segmenti che devono condividere caratteristiche simili tra di loro;
- La pianificazione della manutenzione stradale deve avere una lista ben definita di attività di M&R, le quali avranno costi diversi e diversi impatti sul miglioramento della pavimentazione. Inoltre, la pianificazione verrà fatta periodo per periodo, avendo, appunto, suddiviso l'orizzonte di osservazione in periodi discreti di tempo;
- Per ogni segmento, sarà selezionata una sola attività per ogni periodo.
- Le condizioni della pavimentazione stradale sono definite in base al Pavement Surface Rating (New York State Department of Transportation 2010). L'indicatore varia in una scala da 1 a 10, si basa sulla severità dei danni alla superficie della pavimentazione stradale e viene usato per identificare le categorie generali delle attività di manutenzione per il risanamento stradale, come già detto nel lavoro di [3].
- Dovendo mitigare gli effetti collaterali dell'apertura dei cantieri stradali, la loro distribuzione dovrà essere opportunamente definita nel rispetto anche di un preciso criterio di distanziamento;
- Inoltre, si assume che ogni attività di M&R abbia luogo all'inizio del periodo, così che il miglioramento avvenga all'inizio dell'anno mentre il deterioramento del segmento viene considerato alla fine dello stesso anno.

Nella **TABELLA 1**, viene illustrato come per ogni livello di qualità in cui si trova il segmento, sono possibili uno o più attività di manutenzione, tra cui il modello può scegliere di applicare.



## 3.2 Formulazione del modello

In questa sezione, si descrive il modello di ottimizzazione matematica proposto per risolvere il problema di pianificare e schedulare le attività di manutenzione del manto stradale, sotto le assunzioni definite nel paragrafo precedente. In particolare, si introducono gli insiemi ed i parametri usati.

Insiemi e parametri

- $S$  Insieme dei segmenti che compongono la rete stradale.
- $R$  Insieme delle attività di M&R.
- $T$  Insieme dei periodi.
- $L$  Insieme delle possibili condizioni della pavimentazione stradale.
- $B$  Parametro che definisce il budget per ogni periodo.
- $I_s$  Condizione iniziale del segmento  $s$  prima dell'intera programmazione delle attività di M&R.
- $l^0$  Condizione del segmento  $s$  all'inizio del periodo.
- $c_r$  Costo del  $r$ -esimo trattamento.
- $\alpha$  Parametro che definisce quanti  $\alpha$  segmenti devono intercorrere tra un'operazione di M&R ed un'altra.
- $\bar{Z}$  Parametro che indica la minima condizione media ammessa;
- $Imp(l^0, r)$  miglioramento della condizione del segmento quando viene selezionata l'operazione  $r$  nella condizione  $l^0$ .
- $Det(\bar{l})$  Deterioramento per qualsiasi segmento che si trova nella condizione  $\bar{l}$  durante il corso di un anno.
- $\bar{l}(l^0, r)$  Condizione calcolata alla fine dell'anno dopo che il miglioramento abbia avuto effetto sul segmento in condizione  $l^0$ ;  
 $\bar{l} = l^0 + Imp(l^0, r)$ .

$A(l) = \{(l^0, r): l^0 + Imp(l^0, r) - Det(\bar{l}) = l\}$ : è una funzione, esposta nel lavoro di [3], che ha lo scopo di determinare la variazione delle condizioni del segmento durante l'anno, dove inizialmente abbiamo la condizione  $l^0$ , poi un certo miglioramento in base all'operazione di M&R che verrà eseguita in base allo stato. Alla fine del periodo, verrà considerato il fattore di deterioramento in base alla condizione  $\bar{l}$ . La **DI SEGUITO** viene proposta una tabella riassuntiva della tabella precedente, ma questa volta anche con una quantificazione numerica del miglioramento apportato dalla singola attività di M&R.

Tabella 2. Tabella riassuntiva operazioni M&R riassume tutte le azioni di M&R che indicativamente possono essere selezionate in base allo stato del segmento, con il loro contributo al miglioramento delle condizioni del segmento.

Quindi, si fornisce una descrizione delle variabili decisionali introdotte per la formulazione del modello di ottimizzazione matematica proposto.

#### Variabili

- $X_{tsr}$  Variabile binaria pari a 1 se nel periodo  $t$  per il segmento  $s$  l'attività  $r$  è stata selezionata, 0 altrimenti.
- $Z_{tsl}$  Variabile binaria pari a 1 se nel periodo  $t$  il segmento  $s$  si trova nella condizione  $l$ , 0 altrimenti.
- $Y_{tslr}$  Variabile binaria pari a 1 se l'attività  $r$  è stata scelta per il segmento  $s$  che si trova nella condizione  $l$  nel periodo  $t$ , 0 altrimenti.

#### Indici

- $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ : indice per gli anni.
- $s \in \{1, 2, \dots, S\}$ : indice per i segmenti
- $r \in \{1, 2, \dots, R\}$ : indice per le attività di M&R
- $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ : indice per i livelli di condizione.

#### Funzione obiettivo

La funzione obiettivo, da massimizzare, rappresenta le condizioni della rete in tutto l'orizzonte temporale di pianificazione. È in altre parole una misura dell'affidabilità del manto stradale nell'orizzonte di pianificazione.

$$\max z = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L Z_{tsl} \times l. \quad (1)$$

#### Vincoli

Affinché venga imposta una condizione iniziale ad ogni segmento, il vincolo (2) garantisce l'assegnamento di un livello alla pavimentazione stradale attraverso i valori in input di  $I(s)$ .

$$Z_{0sl} = 1 \quad \forall t > 0, l = I(s). \quad (2)$$

Il vincolo (3) ci assicura che, in ogni periodo, ogni segmento abbia un livello di condizione.

$$\sum_{l=1}^L Z_{tsl} = 1, \quad \forall t > 0, s. \quad (3)$$

Il vincolo (4) determina la condizione del segmento ad ogni periodo. In altre parole, si tratta di un vincolo che consente di aggiornare le condizioni di un segmento periodo per periodo, in base alle scelte implementate nel periodo precedente.

$$\sum_{(l^0, r) \in A(l)} Y_{(t-1)sl^0 r} = Z_{tsl}, \quad \forall t > 0, s, l. \quad (4)$$

Siccome bisogna garantire che per ogni segmento, in ogni periodo, venga scelta una sola operazione di M&R, ricorriamo al vincolo (5).

$$\sum_{r=1}^R X_{tsr} = 1, \quad \forall t > 0, s. \quad (5)$$

La prima variazione proposta in questo lavoro di tesi è nel vincolo (6) che, originariamente, in ogni periodo  $t$  e per ogni segmento  $s$ , imponeva che livello non fosse inferiore al parametro  $\bar{Z}$ . Ciò, tuttavia, avrebbe potuto provocare inammissibilità per via dei nuovi vincoli aggiunti che riguardano la non “adiacenza” dei cantieri attivi, vincoli che verranno descritti in seguito. Di conseguenza, invece di imporre che per ogni singolo segmento si abbia una condizione di maggiore o tutt’al più uguale al parametro  $\bar{Z}$ , è stata presa la decisione di garantire che l’intera rete debba rispettare un certo standard qualitativo medio, ovvero, il vincolo (6) prende in considerazione il livello medio della rete stradale, e impone che esso sia maggiore o uguale al valore prestabilito  $\bar{Z}$ .

$$\sum_{l=1}^L Z_{tsl} \times l / S \geq \bar{Z}, \quad \forall t > 0. \quad (6)$$

Il vincolo (7) impone il rispetto del budget annuale B

$$\sum_{s=1}^N \sum_{r=1}^R X_{tsr} \times c_r \leq B, \quad \forall t > 0. \quad (7)$$

I vincoli (8) e (9) impongono alla programmazione delle attività di M&R l’assenza di almeno  $\alpha$  cantieri tra i segmenti sottoposti alle operazioni di M&R. In altre parole, nel caso in cui l’attività  $r$  venga selezionata per il segmento  $s$  al periodo  $t$ , allora per i precedenti e successivi  $\alpha$  segmenti non dovrà esser prevista alcuna attività di M&R. In questo caso, l’indicizzazione delle  $r$  attività di M&R non deve considerare l’operazione “non fare nulla” (Do nothing).

Viene proposta la seguente formulazione per ovviare ai problemi sorti durante le prime fasi di validazione:  $\sum_1^{j<S}$ ,  $\sum_1^{j<S-s}$ . Infatti, sono state riscontrate difficoltà nell'imporre il distanziamento tra la programmazione delle attività di M&R agli estremi dell'insieme dei segmenti S.

$$\sum_1^{j<S} \sum_{r=2}^R X_{t(s-j)r} \leq 1 - \sum_{r=2}^R X_{tsr} \quad \forall t, s \neq 1; \text{ con } j \leq \alpha. \quad (8)$$

$$\sum_1^{j \leq S-s} \sum_{r=2}^R X_{t(s+j)r} \leq 1 - \sum_{r=2}^R X_{tsr}, \quad \forall t, s \neq S, \text{ con } j \leq \alpha. \quad (9)$$

Andando ad analizzare un caso limite a riguardo del vincolo di "antecedenza", se il parametro  $\alpha$  assumesse un valore 3 in input, e supponendo che la generica attività  $r$  venga selezionata per il segmento identificato dall'indice 3 al periodo  $t$ , nel vincolo (8) la prima sommatoria andrà da 1 a 2, e non semplicemente da 1 ad  $\alpha=3$  infatti avremo:

$$X_{t1r} + X_{t2r} \leq 0.$$

Invece della seguente errata formulazione:

$$X_{t0r} + X_{t1r} + X_{t2r} \leq 0$$

Mentre per il vincolo di "posteriorità", mantenendo sempre lo stesso valore di  $\alpha$  pari a 3 come nell'esempio precedente, nel caso limite in cui venisse selezionata la generica attività  $r$  per il segmento di indice 8 al periodo  $t$ , in cui il valore di S corrisponde a 10 in questo caso, si ha:

$$X_{t9r} + X_{t10r} \leq 0.$$

E non:

$$X_{t9r} + X_{t10r} + X_{t11r} \leq 0.$$

Per evitare di ricorrere al legame logico  $Y_{tslr} = Z_{tsl} \times X_{tsr}$ , che renderebbe la formulazione di programmazione non lineare, si ricorre ai seguenti vincoli (10), (11) e (12) di linearizzazione:

$$Y_{tslr} \leq Z_{tsl} \quad \forall t, s, l, r. \quad (10)$$

$$Y_{tslr} \leq Z_{tsl} \quad \forall t, s, l. \quad (11)$$

$$Y_{tslr} \geq Z_{tsl} + X_{tsr} - 1 \quad \forall t, s, l, r. \quad (12)$$

# Capitolo 4

## 4.1 Introduzione

Nel seguente capitolo, verrà dapprima validato il modello matematico proposto nel Capitolo 3 e quindi, si passerà a condurre una campagna sperimentale. Per questo, è stato usato IBM ILOG CPLEX optimization studio (versione 22.1.1.0 per Windows 11 a 64 bit) per implementare e risolvere il modello matematico.

I test sono stati eseguiti su un computer con un processore Intel® Core™ i5-82652 e 8GB di RAM.

Le istanze prese in considerazione sono state generate in maniera casuale con l'uso dell'IDE PyCharm 2023.1.3.

## 4.2 Descrizione delle istanze

Tutte le istanze utilizzate per la campagna sperimentale sono state generate casualmente attraverso un algoritmo in Python, proposto ed implementato in letteratura da [3].

Per validare i vincoli introdotti in questo lavoro (cioè, i vincoli **(8)** e **(9)** descritti nel capitolo 3), è stata usata un'istanza "giocattolo" di piccole dimensioni, formata da 15 segmenti con un arco temporale di programmazione pari ad 8 anni ed un'altra istanza formata da 40 segmenti con un orizzonte temporale di 5 anni, in modo tale da osservare al meglio e in maniera più dettagliata la dislocazione delle attività di M&R nei vari periodi.

Per analizzare le soluzioni ottenute dal modello, il parametro  $\alpha$  è stato impostato a 2 e il valore iniziale di  $\bar{Z}$  equivale a 4; l'istanza usata è formata da 15 segmenti con un orizzonte di programmazione pari ad 8 anni e una condizione iniziale media pari a 5.4 (dove le condizioni iniziali di ogni singolo segmento sono state generate in maniera casuale).

### 4.3 Risultati computazionali

Validazione della formulazione matematica proposta su istanze di piccole dimensioni

Le **ERRORE. L'AUTORIFERIMENTO NON È VALIDO PER UN SEGNALIBRO.** e **ERRORE. L'ORIGINE RIFERIMENTO NON È STATA TROVATA.** mostrano alcuni dei risultati ottenuti durante il lavoro di tesi. In particolare, si riferiscono a due esempi della programmazione delle attività di M&R nel corso di cinque anni, dove il parametro  $\alpha$  è pari a 2 (in **ERRORE. L'AUTORIFERIMENTO NON È VALIDO PER UN SEGNALIBRO.**) e 3 (in **ERRORE. L'ORIGINE RIFERIMENTO NON È STATA TROVATA.**). Inoltre, viene anche riportato il valore della condizione media  $\bar{Z}'$  di tutti i segmenti, e per ogni anno la parte di budget  $\bar{B}$  utilizzata durante l'arco temporale.

Tabella 3 - Programmazione attività M&R con  $\alpha$  pari a 2.

S	t = 0	t = 1	t = 2	t = 3	t = 4	t = 5	t = 6	t = 7	t = 8
1	DN	RC	DN	DN	CM	DN	CM	DN	DN
2	DN	DN	RC	DN	DN	CM	DN	DN	DN
3	PM	DN	DN	CM	DN	DN	DN	RC	PM
4	DN	RH	DN	DN	RC	DN	PM	DN	DN
5	DN	DN	RH	DN	DN	RC	DN	DN	DN
6	RC	DN	DN	CM	DN	DN	DN	RC	DN
7	DN	RC	DN	DN	CM	DN	CM	DN	RH
8	DN	DN	RC	DN	DN	CM	DN	DN	DN
9	RH	DN	DN	RC	DN	DN	DN	RH	DN
10	DN	RC	DN	DN	CM	DN	CM	DN	PM
11	DN	DN	RC	DN	DN	CM	DN	DN	DN
12	RC	DN	DN	CM	DN	DN	DN	RC	DN
13	DN	RC	DN	DN	CM	DN	CM	DN	DN
14	DN	DN	PM	DN	DN	RC	DN	DN	RC
15	CM	DN	DN	RC	DN	DN	DN	RH	DN
$\bar{Z}'$	5,27	5,2	6,34	7	7,13	7	7,13	6,4	7
$\bar{B}$	1305000	1885000	1535000	1310000	1080000	1310000	730000	1770000	785000
$\bar{B}$ (%)	43,50%	62,83%	51,17%	43,67%	36,00%	43,67%	24,33%	59,00%	26,17%

Tabella 4 - Programmazione attività M&R con  $\alpha$  pari a 3.

S	t = 0	t = 1	t = 2	t = 3	t = 4	t = 5	t = 6	t = 7	t = 8
1	DN	RC	DN	DN	DN	DN	RC	DN	DN
2	CM	DN	DN	RC	DN	PM	DN	DN	DN
3	DN	DN	DN	DN	RC	DN	DN	DN	DN
4	DN	DN	RC	DN	DN	DN	DN	RC	DN
5	DN	CM	DN	DN	DN	DN	RC	DN	DN
6	RC	DN	DN	DN	DN	RC	DN	DN	PM
7	DN	DN	DN	RC	PM	DN	DN	DN	DN
8	DN	DN	RC	DN	DN	DN	DN	RC	DN
9	DN	RC	DN	DN	DN	DN	RC	DN	DN
10	RC	DN	DN	DN	DN	RC	DN	DN	DN
11	DN	DN	DN	RC	PM	DN	DN	DN	DN
12	DN	DN	RC	DN	DN	DN	DN	RC	DN
13	DN	RC	DN	DN	DN	DN	RC	DN	DN
14	DN	DN	DN	DN	DN	RC	DN	DN	DN
15	CM	DN	DN	RC	PM	DN	DN	DN	DN
$\bar{Z}'$	5,27	5,06	5,6	6	6,8	6	6,13	6,94	7
$\bar{B}$	1140000	1370000	1200000	1600000	550000	1250000	1600000	1200000	50000
$\bar{B}(\%)$	38,00%	45,67%	40,00%	53,33%	18,33%	41,67%	53,33%	40,00%	1,67%

Nella **TABELLA 5** viene mostrato un altro esempio della programmazione delle attività di M&R in orizzonte temporale pari a 5 anni.

Tabella 5 - Programmazione attività M&R con  $\alpha$  pari a 3 (40 segmenti)

Segmento	Year 0	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5
1	RC	DN	PM	DN	DN	DN
2	DN	DN	DN	DN	RC	DN
3	DN	DN	DN	RC	DN	PM
4	DN	RC	DN	DN	DN	DN
5	DN	DN	RC	DN	DN	DN
6	DN	DN	DN	DN	RC	DN
7	DN	DN	DN	RC	DN	DN
8	RC	DN	DN	DN	DN	DN
9	DN	DN	RC	DN	DN	DN
10	DN	RC	DN	DN	CM	PM
11	DN	DN	DN	DN	DN	DN
12	DN	DN	DN	RC	DN	DN
13	DN	DN	RC	DN	DN	DN
14	CM	DN	DN	DN	RC	RC
15	DN	RC	DN	DN	DN	DN
16	DN	DN	DN	RC	DN	DN
17	DN	DN	RC	DN	DN	DN
18	RH	DN	DN	DN	RC	DN
19	DN	RC	DN	DN	DN	DN
20	DN	DN	DN	RC	DN	DN
21	DN	DN	RC	DN	DN	DN
22	CM	DN	DN	DN	RC	DN
23	DN	RC	DN	DN	DN	DN
24	DN	DN	DN	RC	DN	DN
25	DN	DN	RC	DN	DN	DN
26	CM	DN	DN	DN	RC	DN
27	DN	RC	DN	DN	DN	DN
28	DN	DN	DN	RC	DN	DN
29	DN	DN	RC	DN	DN	DN
30	CM	DN	DN	DN	RC	DN
31	DN	RC	DN	DN	DN	DN
32	DN	DN	DN	RC	DN	DN
33	DN	DN	RC	DN	DN	DN
34	CM	DN	DN	DN	RC	DN
35	DN	RC	DN	DN	DN	DN
36	DN	DN	DN	RC	DN	DN
37	DN	DN	RC	DN	DN	DN
38	DN	DN	DN	DN	RC	DN
39	DN	RC	DN	DN	DN	DN
40	RH	DN	DN	RC	DN	RC
$\bar{Z}'$	5,5	4,57	4,72	5,4	6,425	7,025
$\bar{B}$	2220000	3600000	3650000	4000000	3770000	900000

$\bar{B}(\%)$	27,75%	45,00%	45,63%	50,00%	47,13%	11,25%
---------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Tabella 6 - Programmazione attività M&R con  $\alpha$  pari a 2 (40 segmenti)

Segmento	Year 0	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5
1	DN	RC	DN	DN	CM	DN
2	RH	DN	DN	RC	DN	DN
3	DN	DN	RC	DN	DN	DN
4	DN	RC	DN	DN	CM	DN
5	CM	DN	DN	RC	DN	DN
6	DN	DN	RC	DN	DN	DN
7	DN	RH	DN	DN	RC	PM
8	RC	DN	DN	CM	DN	DN
9	DN	DN	RC	DN	DN	DN
10	DN	RC	DN	DN	DN	RC
11	CM	DN	DN	DN	RC	DN
12	DN	DN	DN	RC	DN	DN
13	DN	DN	RC	DN	DN	DN
14	CM	DN	DN	DN	RC	DN
15	DN	RC	DN	PM	DN	RC
16	DN	DN	RC	DN	DN	DN
17	DN	DN	DN	DN	RC	DN
18	RH	DN	DN	RC	DN	CM
19	DN	DN	RC	DN	DN	DN
20	DN	RC	DN	DN	CM	DN
21	CM	DN	DN	RC	DN	DN
22	DN	DN	RC	DN	DN	DN
23	DN	RC	DN	DN	CM	DN
24	DN	DN	DN	RC	DN	DN
25	DN	DN	RC	DN	DN	DN
26	DN	RH	DN	DN	RC	DN
27	RC	DN	DN	CM	DN	DN
28	DN	DN	RC	DN	DN	DN
29	DN	RC	DN	DN	CM	DN
30	CM	DN	DN	RH	DN	DN
31	DN	DN	RC	DN	DN	DN
32	DN	RH	DN	DN	RC	DN
33	RH	DN	DN	RC	DN	CM
34	DN	DN	RC	DN	DN	DN
35	DN	RC	DN	DN	CM	DN
36	CM	DN	DN	RC	DN	DN
37	DN	DN	RC	DN	DN	DN
38	DN	CM	DN	DN	RH	DN
39	RH	DN	DN	RC	DN	DN
40	DN	DN	RC	DN	DN	PM
$\bar{Z}'$	5,5	4,85	5,1	6,4	7,1	7,57
$\bar{B}$	2960000	4225000	5200000	4275000	3705000	1240000

$\bar{B}$ (%)	37,00%	52,81%	65,00%	53,44%	46,31%	15,50%
---------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Confrontando i risultati in Tabella 3 e quelli in Tabella 4, dove, si fa notare, il parametro di distanziamento  $\alpha$  è maggiore, si osserva che, nel secondo caso (Tabella 4), la condizione media, periodo per periodo, è sempre minore o al più uguale a quella mostrata nel primo caso (Tabella 3). Questo è un risultato ragionevole in quanto avere un distanziamento maggiore limita la possibilità di selezionare attività di manutenzione sui vari segmenti; di seguito vengono elencate le percentuali delle attività M&R selezionate nel caso della tabella 3:

- Ricostruzione (RC) = 40%;
- Riabilitazione (RH) = 14%;
- Manutenzione correttiva (CM) = 34%;
- Manutenzione preventiva (PM) = 12%.

Successivamente le percentuali delle attività illustrate in tabella 4:

- Ricostruzione (RC) = 74%;
- Riabilitazione (RH) = 0%;
- Manutenzione correttiva (CM) = 10%;
- Manutenzione preventiva (PM) = 16%.

Quindi, qualora la selezione dei segmenti su cui implementare operazioni di M&R è limitata per via del parametro di distanziamento, il modello tenderà a selezionare maggiormente l'attività col maggiore impatto sulle condizioni del segmento.

Nel caso del parametro di distanziamento maggiore, nonostante la limitata selezione delle attività e la necessità di implementare principalmente le operazioni a maggiore impatto sulla condizione media, i costi sostenuti durante l'intero arco temporale sono minori se messi a confronto al caso dove il parametro di distanziamento è minore (costi per  $\alpha=3$  :9.960.000€; costi per  $\alpha=2$  :11.710.000€). Questo è dovuto proprio al fatto che, dovendo rispettare un distanziamento maggiore, dovrà selezionare meno attività di manutenzione.

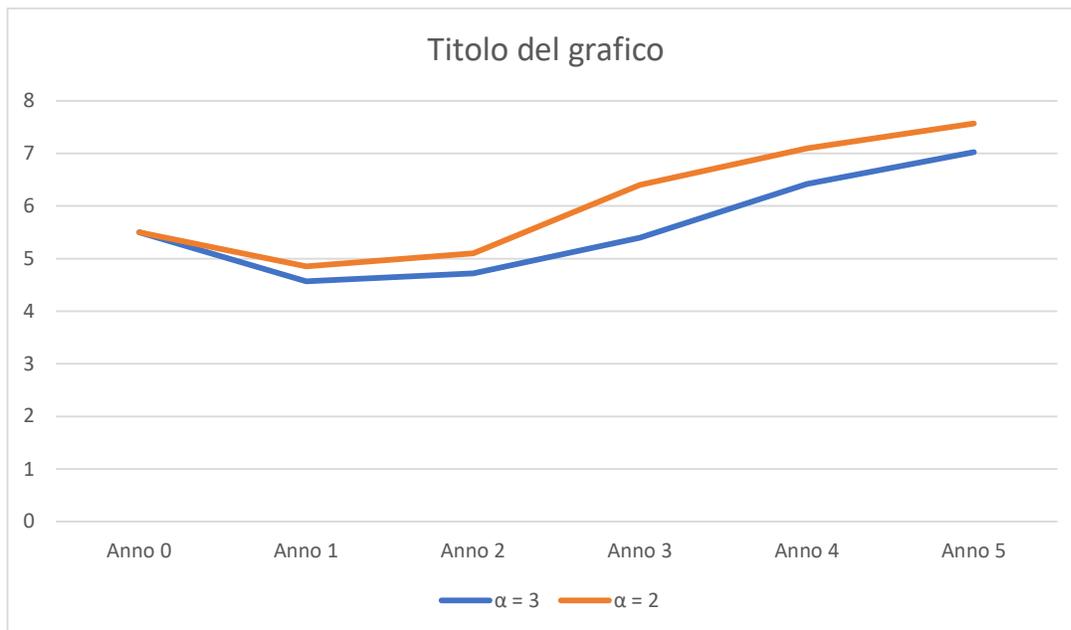
Stesso comportamento si ha confrontando i risultati della Tabella 5 e della Tabella 6. Infatti, osservando i risultati in tabella 5, dove il parametro di distanziamento è 3, il 78% delle attività di M&R implementate consistono nell'operazione di ricostruzione; invece, in tabella 6, dove il parametro di distanziamento è 2, riscontriamo i seguenti risultati:

- Ricostruzione (RC) = 58%;

- Riabilitazione (RH) = 12%;
- Manutenzione correttiva (CM) = 25%;
- Manutenzione preventiva (PM) = 5%.

La **FIGURA 1** mostra il trend di  $\bar{Z}'$ . Come già detto, è evidente che, più i cantieri sono distanziati tra di loro, più le condizioni medie della rete ne risentiranno dove la programmazione delle attività di M&R non rispetterà il bisogno di operare nella maniera più efficiente possibile. In altre parole, il modello invece di prediligere attività di M&R poco onerose da un punto di vista economico e temporale, preferirà operazioni di “Ricostruzione”; anche nel secondo caso, le spese di manutenzioni risultano minori per la programmazione delle attività M&R dove il parametro di distanziamento è maggiore (costi per  $\alpha=3$  :18.140.000€; costi per  $\alpha=2$  :21.605.000€). Però, affinché venga rispettato quanto detto in [2], il parametro  $\alpha$  non deve essere eccessivamente grande rispetto al numero di segmenti contenuti nell’istanza, nonostante i costi diretti di manutenzione risultino minori in casi di parametro di distanziamento sostanzialmente grandi.

Figura 1 – Andamento condizioni medie al variare di  $\alpha$  (40 segmenti)

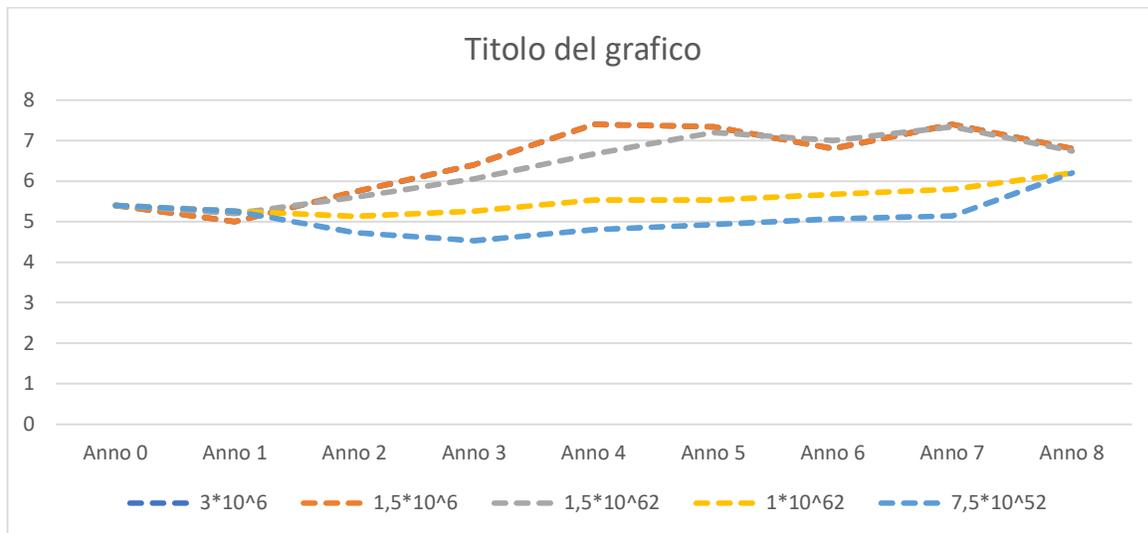


### Analisi di sensitività: budget

La **FIGURA 2** mostra l'andamento delle condizioni medie, per ogni anno, della pavimentazione stradale al variare del budget. In questo esempio, il budget iniziale è  $3 \times 10^6$  mentre il parametro di distanziamento  $\alpha$  è pari a 2. Ciò che si osserva è un comportamento ragionevole, visto che, all'aumentare del budget, le condizioni medie aumentano fino ad un assestamento, imputabile al rispetto della condizione sul distanziamento.

Inizialmente, il tempo di risoluzione richiesto da Cplex risulta sostanzialmente basso. Con il progressivo restringimento del budget, i tempi di calcolo risultano molto alti. La **TABELLA 7** riassume i valori di funzione obiettivo, con eventuale MIP GAP percentuale di Cplex, quando il risolutore non riesce a risolvere all'ottimo l'istanza nel tempo limite di soluzione pari a 30 minuti.

Figura 2 – grafico andamento condizioni medie della pavimentazione stradale.



Come viene mostrato nella **TABELLA 7**, iniziamo a notare una diminuzione del valore della funzione obiettivo una volta dimezzato il budget, il quale viene assegnato in maniera proporzionale al numero di segmenti dell'istanza. La Tabella 7 riporta anche il GAP (%) di CPLEX quando l'istanza non è stata risolta all'ottimo (o meglio, il risolutore non è stato in grado di certificarne l'ottimalità) nel tempo limite a disposizione. Si osserva, quindi, che al diminuire del budget ( $1 \times 10^6$  e  $7,5 \times 10^5$ ), Cplex non è in grado di certificare l'ottimalità della soluzione nel tempo limite di 30 minuti.

Tabella 7 – Variazione Budget

Budget	Funzione Obiettivo	Relative Gap	Solution Time
$3 \times 10^6$	793	-	55''
$2 \times 10^6$	793	-	1' 43''
$1,5 \times 10^6$	777	-	4'50''
$1 \times 10^6$	666	10,98%	>30'
$7,5 \times 10^5$	593	17,89%	>30'

Nonostante i tempi di risoluzione siano notevolmente aumentati con la riduzione del budget, dalla **FIGURA 2**, è possibile notare che l'andamento delle condizioni medie annuali tende ad assumere valori approssimativamente simili. Ovviamente, i valori della funzione obiettivo sono decisamente diminuiti.

### Analisi di sensitività: numero periodi

Nella **TABELLA 8**, vengono riassunti i risultati del modello al variare del numero dei periodi T, dove il tempo limite è stato fissato a 30 minuti e il valore del parametro  $\alpha$  corrisponde a 2.

Osservando l'andamento delle condizioni medie annuali di servizio del manto stradale è possibile notare un trend pressoché simile per tutte le istanze. In altre parole, in questo caso specifico, oltrepassato un certo periodo T, il valore di  $\bar{Z}'$  tende ad assestarsi. Inoltre, nonostante un orizzonte temporale maggiore, il valore di  $\bar{Z}'$  difficilmente supera una certa soglia.

In questo caso, si osserva che solamente il caso in cui T=13 non viene risolto all'ottimo (o meglio, certificato ottimo) da Cplex, avendo un Gap di circa 1.35%. Anche questo è un risultato ragionevole in quanto, aumentando il numero di periodi, aumenta anche significativamente la complessità dell'istanza, in termini di numero di variabili e di vincoli.

Tabella 8 – Variazione numero di periodi

T / Istanza	T=8	T=9	T=10	T=11	T=13
0	5,50	5,40	5,40	5,40	5,40
1	5,00	5,00	4,87	4,87	5,00
2	5,73	7,73	5,87	5,87	5,73
3	6,40	6,40	7,00	7,00	6,40
4	7,40	7,40	7,13	7,13	7,40
5	7,33	7,33	6,93	6,93	7,33
6	6,80	6,80	5,53	5,53	6,80
7	7,40	7,40	6,47	6,47	7,40
8	6,80	6,73	7,73	7,73	6,73
9		6,87	7,73	7,73	5,87
10			7,40	7,40	7,00
11				6,80	6,33
12					7,67
13					7,00
Tempo	00:55:28	01:41:51	02:38:34	11:43:13	>30:00:00
Relative GAP	-	-	-	-	1,35%

### Analisi di sensitività: numero di segmenti

Nella **TABELLA 9**, si riportano i risultati al variare del numero di segmenti. In questo caso, sono stati mantenuti gli stessi parametri, fatta eccezione per i segmenti, il cui numero è stato variato in maniera casuale.

Nonostante aver settato il tempo limite molto basso (30 minuti) e l'orizzonte temporale di modeste dimensioni ( $T = 8$ ), il GAP % tra la soluzione trovata e la miglior soluzione intera risulta sostanzialmente basso. L'unica nota pressoché scontata riguarda il tempo di risoluzione impiegato, che in questo caso è aumentato in maniera esponenziale con l'aumento lineare dei segmenti.

*Tabella 9 - Variazione n. di Segmenti.*

Istanza (n. segmenti)	Funzione obbiettivo	Relative Gap	Tempo
15	793	-	00:58:45
25	1311	-	05:19:05
50	2582	0,934%	>30:00:00
75	3710	1,926%	>30:00:00
100	5101	2,917%	>30:00:00

### Analisi di sensitività: variazione $\bar{Z}$

In questo paragrafo, vengono discussi i risultati al variare delle condizioni minime medie ammesse, cioè il valore  $\bar{Z}$ , senza cambiare gli altri parametri del modello.

Tabella 10 – Variazione  $\bar{Z}$  istanza n.1

$\bar{Z}$	Funzione Obiettivo	Tempo
1	793	56''
2	793	58''
3	793	1'01''
4	793	1'16''
5	793	1'17''
6	inammissibile	-

Dai risultati ottenuti nella **TABELLA 10**, si deduce che, modificando il valore del parametro  $\bar{Z}$ , non si riscontra alcuna differenza nella soluzione trovata (escludendo il caso inammissibile) ed anche i diversi andamenti delle condizioni medie del manto stradale  $\bar{Z}'$  non presentano alcuna differenza (**TABELLA 11**).

Tabella 11 – Andamento condizioni medie istanza n.1

Anno	$\bar{Z} = 1$	$\bar{Z} = 2$	$\bar{Z} = 3$	$\bar{Z} = 4$	$\bar{Z} = 5$
0	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
1	5	5	5	5	5
2	5,74	5,74	5,74	5,74	5,74
3	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
5	7,34	7,34	7,34	7,34	7,34
6	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
7	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8

Ipoteticamente, sembrerebbe logico aspettarsi un aumento in funzione obiettivo con l'aumentare di  $\bar{Z}$  (la funzione obiettivo è il risultato della sommatoria delle condizioni di tutti i segmenti per ogni anno), data la necessità di mantenere ad un livello maggiore le condizioni della rete.

Bisogna, infatti, ricordare che il modello ha come scopo la massimizzazione delle condizioni della rete stradale. Pertanto, a prescindere dal livello medio richiesto, in base alle restrizioni sui cantieri consecutivi a cui è sottoposto e alle risorse disponibili (budget), non può ottenere valori di funzione obiettivo migliori di 793.

A tal proposito, si descrive un secondo caso studio per analizzare la sensitività del modello al variare delle condizioni minime ammesse, dove l'unica differenza, rispetto al caso precedente è nelle condizioni iniziali della rete ( $\bar{Z}'$  al periodo 0 pari a 4.734).

Benché i valori di funzione obiettivo non varino nemmeno questa volta (ERRORE. L'ORIGINE RIFERIMENTO NON È STATA TROVATA.), la **FIGURA 3** mostra gli andamenti delle condizioni medie della rete stradale ad ogni periodo, dove a differenza del caso precedente, si notano variazioni di  $\bar{Z}'$ .

Tabella 12 - risultati analisi al variare di  $\bar{Z}$  istanza n.2

$\bar{Z}$	Funzione Obiettivo	Tempo
1	790	1'16"
2	790	1'04"
3	790	55"
4	790	1'19"
5	790	57"
6	inammissibile	-

Dunque, a seconda della severità delle condizioni medie iniziali, gli unici cambiamenti visibili riguardano gli andamenti delle condizioni medie annuali, dove nel lungo termine, tenderanno ad assumere valori omogenei (figura 3).

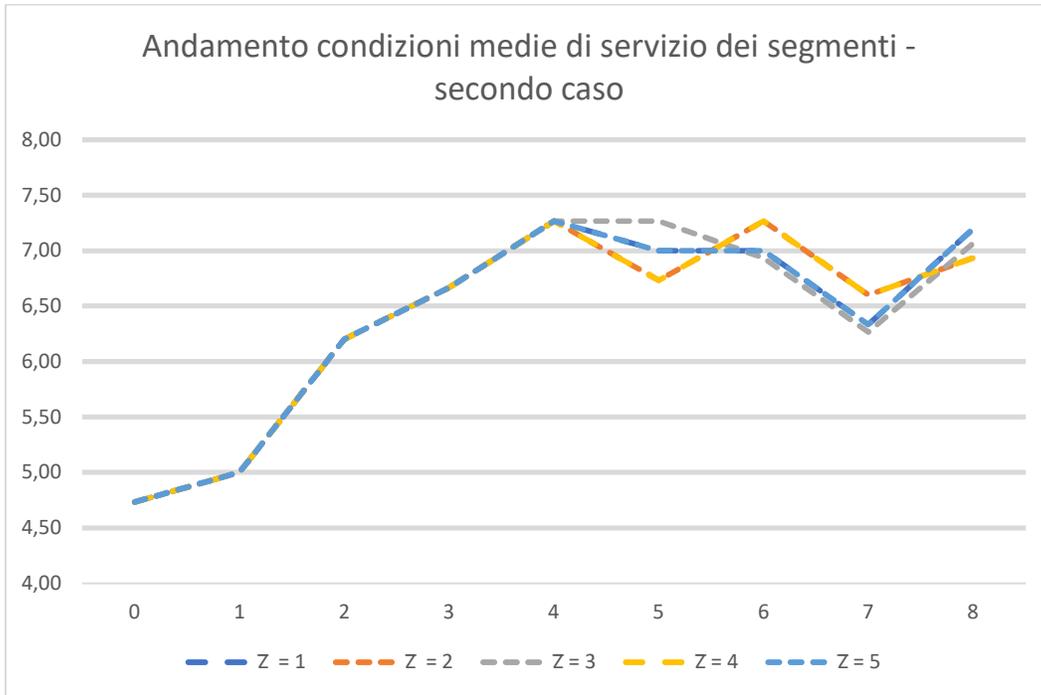


Figura 3 – Andamento  $\bar{Z}'$  istanza n.2

## Capitolo 5

### Conclusioni e sviluppi futuri

L'obiettivo principale in questo lavoro di tesi è stato quello di risolvere il *Pavement Manutention Problem*, ovvero il problema di programmare e schedulare le attività di manutenzione e risanamento delle infrastrutture stradali, cercando di ridurre i sovraccosti logistici causati da una rete in scarse condizioni qualitative. Un contributo del presente lavoro di tesi è stato quello di tenere in considerazione anche il problema legato alla congestione del traffico che si avrebbe qualora si aprissero cantieri molto vicini fra di loro nello stesso periodo temporale.

Infatti, data la stretta correlazione tra la congestione dei flussi di traffico e la suddivisione del manto stradale in più segmenti contigui [1], per evitare i diversi effetti collaterali, come ad esempio una perdita di sicurezza stradale, maggiori emissioni atmosferiche ed un aumento dello stress degli utenti, è stato necessario imporre un criterio sul distanziamento dei cantieri stradali attivati simultaneamente.

Sono state prese in considerazione diverse attività di manutenzione, per garantire la massima resa possibile dalla loro programmazione [2].

In particolare, queste attività comprendono: operazioni di routine, trattamenti superficiali ed interventi più estensivi ed onerosi di riabilitazione intensiva e ricostruzione.

Si è partiti da un modello già esistente in letteratura e lo si è riadattato alle necessità di questo lavoro di tesi.

Il lavoro da cui si è partiti propone, infatti, un modello matematico di Programmazione Lineare Intera in cui, data una rete stradale, suddivisa in segmenti omogenei, un orizzonte temporale, discretizzato in periodi di eguale ampiezza ed un indice di performance qualitativo (dettato da una funzione di degrado annuale), si seleziona, per ogni segmento e periodo, l'attività di manutenzione in maniera da massimizzare lo stato di servizio dell'intera rete stradale, considerando un budget annuale fissato [3].

La riformulazione matematica ha ripreso molti aspetti del modello originale. Prima di tutto, sono stati formulati dei vincoli ad hoc per evitare l'apertura contemporanea di cantieri adiacenti. In particolare, si è imposto che i cantieri stradali attivi debbano distanziarsi di un dato parametro  $\alpha$ .

Quindi, si è modificato il vincolo nel quale si impone un livello minimo sullo stato che ogni singolo segmento stradale dovesse soddisfare alla fine di ogni periodo, visto che questo avrebbe provocato l'inammissibilità del problema per via dei contrasti con i nuovi vincoli di "adiacenza" dei cantieri.

Dall'analisi critica dei risultati, il modello è risultato ragionevolmente sensibile alle variazioni del budget allocato annualmente, al numero dei periodi e al numero dei segmenti contenuti nell'istanza. Infatti, i tempi di risoluzione sono cresciuti esponenzialmente ad un aumento lineare sia del numero di segmenti che dei periodi. Mentre, riguardo il budget, con fondi stanziati sempre più stringenti, anche in questo caso il tempo di calcolo ha subito un aumento significativo; nonostante ciò, la differenza in funzione obiettivo è stata minimale.

Non si osserva sensibilità del modello per quanto riguarda possibili modifiche delle condizioni minime medie ammesse della rete stradale, cioè il parametro  $\bar{Z}$ .

Per questo motivo, si potrebbe modificare il vincolo per garantire un livello minimo di viabilità nella rete, assicurando una maggiore sicurezza stradale ed una riduzione delle emissioni.

Per quanto concerne la funzione di deterioramento, si potrebbe prendere in considerazione il livello di traffico, su ogni segmento, cioè, valutare il livello di traffico come ulteriore indice di "performance", ovvero, più esso è alto sul segmento, più il suo tasso di degrado annuale è elevato, provocando di conseguenza una maggiore richiesta di interventi, se necessari.

## Riferimenti Bibliografici

1. Serratore, A., Chiappinelli, G., Rizzo, G. (2023): *IL CANTIERE STRADALE: ANALISI DEI RISCHI INTERFERENZIALI IN AMBITO AUTOSTRADALE*. Politecnico di Torino, Webthesis Biblioteche d'ateneo, 131.
2. Galehouse, L., Moulthrop, J.S., and Hicks, R.G., (2003–9): *PRINCIPLES OF PAVEMENT PRESERVATION: DEFINITIONS, BENEFITS, ISSUES, AND BARRIERS*; 9.
3. Gomes Correia, G., de Oliveira e Bonates, T., de Athayde Prata, B., & Ferreira Nobre Júnior, E. (2021): *An integer linear programming approach for pavement maintenance and rehabilitation optimization*, International Journal of Pavement Engineering, 18, DOI: 10.1080/10298436.2020.1869736.
4. Liu, S.-S.; Budiwirawan, A.; Arifin, M.F.A.; Chen, W.T.; Huang, Y.-H. **OPTIMIZATION MODEL FOR THE PAVEMENT POTHOLE REPAIR PROBLEM CONSIDERING CONSUMABLE RESOURCES.**
5. James, C. Chu, Kai-Hsiang, H. (2018): **MATHEMATICAL PROGRAMMING FRAMEWORK FOR MODELING AND COMPARING NETWORK-LEVEL PAVEMENT MAINTENANCE STRATEGIES** , 25.
6. Jinwoo, L., Samer, M., Darren, R. (2016)**PAVEMENT SYSTEMS RECONSTRUCTION AND RESURFACING POLICIES FOR MINIMIZATION OF LIFE-CYCLE COSTS UNDER GREENHOUSE GAS EMISSIONS CONSTRAINTS**,Transportation Research, 13.
7. Geoffroy, D.N. and Shufon, J.J., 1992. **NETWORK-LEVEL PAVEMENT MANAGEMENT IN NEW YORK STATE: A GOAL-ORIENTED APPROACH**. Transportation Research Record, 1344 (1), 57–65.