



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Ingegneria Civile Ambientale – Indirizzo Infrastrutture Viarie
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali – DICAM
Ingegneria Civile e Architettura – Strade, ferrovie e aeroporti – ICAR/04

AN INTEGRATED MODEL TO EVALUATE TECHNICAL ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC SUSTAINABILITY OF ROAD PAVEMENT

IL DOTTORE
Silvia Noto

IL COORDINATORE
Prof. Ing. Orazio Giuffrè

IL TUTOR
Prof. Ing. Gaetano Di Mino



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Ingegneria Civile Ambientale – Indirizzo Infrastrutture Viarie
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali – DICAM
Ingegneria Civile e Architettura – Strade, ferrovie e aeroporti – ICAR/04

AN INTEGRATED MODEL TO EVALUATE TECHNICAL ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC SUSTAINABILITY OF ROAD PAVEMENT

IL DOTTORE
Silvia Noto

IL COORDINATORE
Prof. Ing. Orazio Giuffrè

IL TUTOR
Prof. Ing. Gaetano Di Mino

List of Publications

G. Di Mino, G. Salvo, S. Noto. “*A multidisciplinary approach using LCCA and micro-simulation model for the management of the urban pavements*”, *Advances in Transportation Studies*, Special Issue, Vol. 1, pagg. 101-112, 2014.

G. Di Mino, M.R. De Blasiis, S. Noto. “*Advanced Pavement Management System Based on the Genetic Algorithm Optimisation*”, *Proceedings of The Third International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural And Environmental Engineering – CSC2013*, Cagliari, 2013.

G. Di Mino, C.M. Di Liberto, C. Maggiore, S. Noto. “*A dynamic model of ballasted rail track with bituminous sub-ballast layer*”, *Procedia – Social and Behavioral Science*, Vol. 53, pagg. 366-378, 2012.

List of Figures

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Rating systems to evaluate the sustainability of road construction [39] | 22 |
| 3.1 | Road flexible pavement scheme | 36 |
| 3.2 | Tyre-pavement interactions | 37 |
| 3.3 | Sovrastruttura stradale flessibile | 39 |
| 3.4 | Sovrastruttura stradale semirigida. | 40 |
| 3.5 | Sovrastruttura stradale rigida | 41 |
| 3.6 | Sovrastruttura stradale ad elementi (in masselli) . . | 41 |
| 3.7 | Massicciata in macadam | 45 |
| 3.8 | Strati caratteristici di una pavimentazione flessibile | 49 |
| 3.9 | Gravi fessurazioni su pavimentazioni stradali . . . | 53 |
| 3.10 | Ormaiamenti su pavimentazioni stradali | 53 |
| 3.11 | Differenza tra fatica e deformazioni permanenti . . | 63 |
| 3.12 | Teoria meccanicistica [7] | 73 |
| 3.13 | Ciclo di isteresi nel piano sforzo-deformazione (un ciclo di carico), prova a deformazione controllata | 80 |
| 3.14 | Risposta deformativa del conglomerato bituminoso sottoposto ad un carico di tipo statico | 85 |
| 3.15 | delle deformazioni residue del conglomerato bituminoso sottoposto ad un carico ciclico | 86 |
| 3.16 | Addensamento monodimensionale | 88 |

| | | |
|------|--|-----|
| 3.17 | Rifluimento laterale | 89 |
| 3.18 | Deformazione meccanica | 90 |
| 4.1 | Formazione del bitumen | 116 |
| 4.2 | Il processo produttivo in raffineria: la fase di distillazione [4] | 119 |
| 4.3 | Sistema di espansione del bitume | 124 |
| 4.4 | A sinistra: Fase di stesa; a destra: fase di compattazione [2] | 135 |
| 4.5 | Temperature di produzione e di stesa dei conglomerati bituminosi [3] | 136 |
| 4.6 | A sinistra: Area di stoccaggio inerti; a destra: ingresso degli inerti nell'essiccatore [2] | 147 |
| 4.7 | Serbatoi stoccaggio bitumen | 149 |
| 4.8 | Impianto di mescolamento del bitume con gli inerti [1] | 150 |
| 4.9 | Tramoggia di carico con attigua cabina comandi. . | 150 |
| 4.10 | A sinistra: Torre di confezionamento; a destra: scarico del bitume in automezzo [2] | 151 |
| 4.11 | Diagramma di flusso del ciclo produttivo del conglomerato bituminoso | 151 |
| 4.12 | Schema di un impianto discontinuo [2] | 152 |
| 4.13 | Schema di un impianto continuo [2] | 153 |
| 4.14 | Il processo di riciclaggio [9] | 163 |
| 4.15 | Tipico treno di riciclaggio per l'aggiunta di boiaccia cementizia | 165 |
| 5.1 | Rifacimento superficiale: Stesa del conglomerato bituminoso | 188 |
| 5.2 | Rifacimento superficiale: Compattazione | 188 |
| 5.3 | Criteri di dimensionamento di una pavimentazione stradale | 192 |
| 6.1 | Virgin aggregates check-list | 201 |
| 6.2 | Filler check-list | 201 |
| 6.3 | Reclaimed asphalt check-list | 202 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.4 | Additive check-list | 202 |
| 6.5 | Plant check-list | 205 |
| 6.6 | Production check-list | 206 |
| 6.7 | Stockpile Storage check-list | 207 |
| 6.8 | Heating and drying process check-list | 207 |
| 6.9 | Construction check-list | 211 |
| 6.10 | Milling check-list | 211 |
| 6.11 | A layer system in cylindrical coordinates [1] | 216 |
| 6.12 | Steps of the asphalt life cycle [3] | 218 |
| 6.13 | Constants window | 221 |
| 6.14 | Extract from excel spreadsheet from “Traffic quota” for DL 10 years | 222 |
| 6.15 | Particular of Fig. 6.14 | 222 |
| 6.16 | SPES structure | 223 |
| 7.1 | A19 Freeway | 230 |
| 7.2 | SS113 Highway | 230 |
| 7.3 | Section | 231 |
| 7.4 | Diversion and work-zone | 231 |
| 7.5 | Places of interest | 233 |
| 7.6 | SPES structure | 234 |
| 7.7 | AADT at km 6.00 on A19 Freeway dir. PA-CT .. | 243 |
| 7.8 | Extract of geologic chart n. 250 of Italy - Scale 1:50000 | 244 |
| 7.9 | Termopluviometer stations in Sicily | 247 |
| 7.10 | Temperature trend inner pavement | 251 |
| 7.11 | WTM output | 267 |
| 7.12 | Emissions | 270 |
| 7.13 | Alternative strategies comparison (MkgCO _{2e} vs %RAP) | 271 |
| 7.14 | Alternative strategies comparison (MkgCO _{2e} vsDL) | 271 |
| 7.15 | TUS and Inflation rate trends | 274 |

List of Tables

| | | |
|-----|---|-----|
| 3.1 | Principali fattori da cui dipende il fenomeno dell'ormaiamento nei conglomerati bituminosi [12] | 96 |
| 3.2 | Principali test per lo studio dell'attitudine dei conglomerati bituminosi alle deformazioni permanenti [12] | 98 |
| 4.1 | Classi di penetrazione del bitume [4] | 122 |
| 4.2 | Tecniche di riciclaggio diffuse in alcuni Paesi Europei | 170 |
| 5.1 | Degradi delle pavimentazioni stradali flessibili .. | 184 |
| 5.2 | Tecniche di intervento | 189 |
| 6.1 | LCA model and relations between worksheets in it | 200 |
| 7.1 | Transportation distances | 233 |
| 7.2 | Places of interest | 233 |
| 7.3 | Equipments | 239 |
| 7.4 | ANAS traffic data at km 6.00 Bagheria on A19 Freeway | 242 |
| 7.5 | Maximum and minimum temperatures of each month recorded in each year of series | 248 |
| 7.6 | Average monthly temperature | 249 |
| 7.7 | Average air temperature | 250 |
| 7.8 | Full Depth Repair operations | 254 |

| | | |
|------|---|-----|
| 7.9 | Resurfacing operations | 255 |
| 7.10 | Reconstruction operations | 255 |
| 7.11 | Interventions's durations for design life equal to 10 years | 256 |
| 7.12 | Interventions's durations for design life equal to 20 years | 257 |
| 7.13 | Interventions's durations for design life equal to 30 years | 258 |
| 7.14 | Interventions's durations for design life equal to 40 years – 0-30%RAP | 259 |
| 7.15 | Interventions's durations for design life equal to 40 years – 50% RAP | 260 |
| 7.16 | Models for estimating International Roughness Index | 262 |
| 7.17 | Interventions strategies | 264 |
| 7.18 | Emissions | 269 |
| 7.19 | Net Present Value | 273 |
| 7.20 | SPES results | 275 |

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutata nella realizzazione della tesi: a loro va la mia gratitudine.

Ringrazio, anzitutto, il Prof. Gaetano Di Mino per la sua costante, paziente e appassionata supervisione.

Proseguo con i docenti del Dipartimento EX-DIIV oggi DICAM i quali si sono susseguiti sin dall'inizio del mio percorso accademico. Un ringraziamento lo rivolgo al personale del DICAM, in particolare al Responsabile dei Laboratori, il Geom. Antonio Lorello, al Responsabile della Biblioteca, il Dott. Ruggero Garaffa, per essere sempre riuscito ad ascoltare ed interpretare le mie richieste facilitando la mia ricerca, alla Dott.ssa Maria Rita Cinà e alla Dott.ssa Giovanna Chichi.

Desidero, inoltre, ringraziare il Dr Tony Parry e il Dr Davide Lo Presti per il sostegno e il contributo datomi durante il mio soggiorno di ricerca presso il Dipartimento NTEC della University of Nottingham e a tutti i colleghi che hanno saputo rendere proficuo e piacevole il mio soggiorno.

Un ringraziamento particolare va ai colleghi e agli amici che mi hanno incoraggiata, in particolare, il Dr Ciro Maurizio Di Liberto ed Elenia e Daniele.

Infine, ma non meno importante, vorrei rivolgere il mio più sentito ringraziamento alle persone a me più care che sempre mi hanno dato il loro sostegno, incoraggiamento ed affetto: la mia famiglia e Angelo, il mio fidanzato. Ed è proprio a voi, Mamma, Papà, Claudia, Carla, Angelo, che dedico questo lavoro.

Dichiarazione

La presente tesi è stata redatta presso l'Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM), nel periodo Gennaio 2012 – Dicembre 2014.

La dottoranda Silvia Noto e il Tutor della tesi, il Prof. Ing. Gaetano Di Mino, garantiscono, firmando tale tesi, che il lavoro è stato svolto dalla dottoranda sotto la direzione del Tutor e che sono stati rispettati i diritti di altri autori che sono stati citati ogni qualvolta i loro risultati o pubblicazioni sono stati impiegati.

Si dichiara che il lavoro qui presentato non è stato presentato presso nessun'altra Università.

Silvia Noto

Palermo

Gennaio 2015

Contents

| | | |
|--|---|-----------|
| | List of Publications | i |
| | List of Figures | ii |
| | List of Tables | v |
| | Ringraziamenti | vii |
| | Dichiarazione | viii |
| | | |
| CHAPTER 1: INTRODUCTION | | |
| 1.1. | Introduction | 1 |
| 1.2. | Research aims and objectives | 4 |
| 1.3. | General approach | 6 |
| | References | 10 |
| | | |
| CHAPTER 2: LITERATURE REVIEW | | |
| 2.1. | Life Cycle Assessment | 13 |
| 2.2. | Life Cycle Cost Analysis | 17 |
| 2.3. | Merging technique | 21 |
| | References | 25 |
| | | |
| CHAPTER 3: FLEXIBLE ROAD PAVEMENT | | |
| 3.1. | Introduction | 35 |
| 3.2. | Classificazione delle pavimentazioni | 39 |
| 3.3. | Le pavimentazioni stradali flessibili | 42 |
| 3.4. | I fenomeni di degrado delle pavimentazioni | 50 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 3.5. | Le sollecitazioni agenti | 55 |
| 3.5.1. | Sollecitazioni dovute al transito dei veicoli | 55 |
| 3.5.2. | Sollecitazioni di origine termica | 57 |
| 3.6. | Il fenomeno della fatica nella sovrastruttura stradale | 58 |
| 3.6.1. | La fatica: fattori endogeni | 64 |
| 3.6.2. | La fatica: fattori esogeni e sviluppo del danno provocato | 66 |
| 3.6.3. | Teorie di studio della fatica | 67 |
| 3.6.3.1. | Approccio fenomenologico | 68 |
| 3.6.3.2. | Approccio in termini di danno | 70 |
| 3.6.3.3. | Approccio basato sul meccanismo della frattura | 73 |
| 3.6.3.4. | Approccio energetico | 78 |
| 3.6.4. | Apporti scientifici all'approccio energetico | 81 |
| 3.7. | La deformazione permanente del conglomerato bituminoso | 84 |
| 3.7.1. | La formazione di ormaie | 87 |
| 3.7.2. | Fenomeni connessi alla presenza di ormaie sul piano stradale | 90 |
| 3.7.2.1. | Effetto rotaia | 91 |
| 3.7.2.2. | Accumulo di acqua meteorica | 91 |
| 3.7.2.3. | Decadimento della funzionalità della sovrastruttura | 92 |
| 3.7.2.4. | Discomfort di guida | 93 |
| 3.7.3. | I fattori che generano il fenomeno di deformazione permanente | 93 |
| 3.7.4. | Lo studio del fenomeno della deformazione permanente in laboratorio | 96 |
| | References | 100 |

CHAPTER 4: BITUMINOUS MIXTURES

| | | |
|-------------|-------------------------------|------------|
| 4.1. | Introduction | 111 |
|-------------|-------------------------------|------------|

| | | |
|-------------|--|------------|
| 4.2. | Gli aggregati lapidei | 113 |
| 4.3. | Il bitume | 115 |
| 4.3.1. | Prove su bitume | 120 |
| 4.3.2. | Classificazione dei bitumi | 122 |
| 4.3.3. | Gli additivi | 126 |
| 4.4. | Il conglomerato bituminoso tradizionale | 128 |
| 4.4.1. | Cenni sul mix-design dei conglomerati bituminosi e aspetti tecnologici di produzione e posa in opera | 130 |
| 4.5. | I conglomerati bituminosi innovativi | 136 |
| 4.5.1. | I conglomerati bituminosi con RAP | 140 |
| 4.6. | Impianti e tecniche produttive | 144 |
| 4.6.1. | Il ciclo produttivo dei conglomerati bituminosi tradizionali | 144 |
| 4.6.1.1. | Approvvigionamento e pretrattamento degli inerti | 146 |
| 4.6.1.2. | Stoccaggio di bitume | 148 |
| 4.6.1.3. | Miscelamento degli inerti con il bitume | 149 |
| 4.6.2. | Il conglomerato bituminoso con RAP: tecniche di riciclaggio | 153 |
| 4.6.2.1. | Tecniche di riciclaggio in impianto fisso | 154 |
| 4.6.2.2. | Tecniche di riciclaggio in sito | 157 |
| 4.6.3. | Confronto fra le tecniche di riciclaggio | 165 |
| | References | 171 |

**CHAPTER 5: MAINTENANCE AND
REHABILITATION**

| | | |
|-------------|---|------------|
| 5.1. | Introduction | 175 |
| 5.2. | La manutenzione delle pavimentazioni stradali flessibili | 176 |
| 5.2.1. | Proprietà fondamentali delle pavimentazioni ... | 178 |
| 5.2.2. | Gli indicatori di stato | 180 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 5.2.3. | Tecniche di rilevamento | 180 |
| 5.3. | I degradi | 181 |
| 5.4. | Tecniche di intervento | 185 |
| 5.4.1. | Manutenzione ordinaria e straordinaria | 186 |
| 5.4.2. | Manutenzione programmata | 189 |
| | References | 194 |

CHAPTER 6: METHODOLOGY

| | | |
|-------------|---------------------------------------|------------|
| 6.1. | Introduction | 197 |
| 6.2. | Research approach | 198 |
| 6.3. | Tools | 214 |
| 6.3.1. | KenPave | 214 |
| 6.3.2. | asPECT | 216 |
| 6.3.3. | Excel spreadsheet for costs | 222 |
| 6.4. | Merging technique | 223 |
| | References | 225 |

CHAPTER 7: CASE STUDY

| | | |
|-------------|---|------------|
| 7.1. | Introduction | 227 |
| 7.2. | Objectives | 228 |
| 7.3. | Case study's frame (description) | 229 |
| 7.4. | Methodology | 234 |
| 7.4.1. | Assumptions | 236 |
| 7.4.2. | Pavement design and design factors | 241 |
| 7.4.3. | Traffic | 242 |
| 7.4.4. | Subgrade | 243 |
| 7.4.5. | Mechanic properties of materials | 244 |
| 7.4.6. | Weather conditions | 246 |
| 7.4.7. | Interventions | 251 |
| 7.4.8. | Alternative strategies | 261 |
| 7.5. | Global Warming Potential results | 268 |

| | | |
|-------------|--------------------------------------|------------|
| 7.6. | Economic results | 272 |
| 7.7. | Merging results | 274 |
| 7.8. | Summary and conclusions | 277 |
| | References | 279 |

1.1 Introduction

The unconditional exploitation of environmental resources, the emission of xenobiotic substances in nature and resulting pollution from the development of human activities have led, over time, to serious repercussions on the environment. Therefore these effects weigh on economic and social development. The need to deal with environmental issues and their relationship with economic development has led to the definition of sustainable development concept . The concept of sustainability combines three fundamental aspects which can not be separated, namely environmental, economic and social.

The increasing sensitivity towards these socio-economic issues has driven research towards new fronts, using models that allow to evaluate the environmental sustainability and economic feasibility of any development process.

In infrastructure engineering field the construction of a road infrastructure, be it road or rail, implies an articulated and complex series of actions and technical interventions which involve significant resources and entail an ever increasing environmental consumption. The construction or reconstruction of the entire flexible pavement structure or rail-track, or only on certain layers, is typical of the impoverishment of the environment because, depending on the extent of work, generally significant, large quantities of not-renewable resources such as stony aggregates, cement and binder are used.

In addition to the impoverishment of the not-renewable resources, the environmental impact is closely related to the production technological processes that are strongly characterized by huge amounts of pollutant emissions.

The integrated model consists of two approaches, namely the Life Cycle Assessment [LCA – UNI EN ISO 14040 – 14041 – 14042 – 14043; Green Book COM 2001/68/CE – 2003/302/CE; EMAS 1221/2009] and the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). These approaches, well established in the international field, allow to evaluate the environmental impacts linked to a product, process or activity, through the identification and quantification of mass balances concerning materials, energy and pollutant emissions released into the environment during production process since construction to operating phases such as maintenance and rehabilitation with regard to the LCA; whereas the LCCA allows to optimize the overall cost of a system and of its running considering its entire life cycle as suggested by DPR 207/2012 and by standard UNI CEI EN 16001 Energy Management Systems.

The new model *SPES – Sustainable Pavement Evaluation System* resulting from the integration of LCA and LCCA would allow to conduct a complete analysis of the superstructure taking into account the steps of entire process, namely production, construction and maintenance and rehabilitation interventions; otherwise an application of single procedure could bring to incomplete or wrong conclusions and not properly founded.

The management of maintenance interventions on road pavement should be based on economic and environmental criteria that entail the same objective: the reduction of resource's consumption. Sometimes such management seems to prescind from both design and constructive aspects and bituminous mixtures and superstructure made of them and finally specific intervention techniques.

The present thesis is determined to outline a description in which all above mentioned aspects are debated with the same analysis' accuracy and summary's completeness. In fact it considers as a fundamental principle the idea that the management process, in order to be really efficient, has to be ruled by a specialist who knows in depth not only management subject matters but also above all design, constructive and maintenance aspects of the treated theme.

Definitively it considers the figure of Civil Engineer like an essential tool for road pavement management.

1.2 Research Aims and Objectives

The aims of the research can be summarize according to the following list:

1. Analysis of the state of the art of materials for road pavement, focusing on the study of technologies for the production of traditional and innovative asphalt (RAP Reclaimed Asphalt Pavement);
2. Study of RAP: mix-design and rutting performance;
3. Study of LCA method;
4. Study of LCCA method;
5. Analysis, study and determination of an LCA-LCCA integrated model.

The aims have been carried out through:

1. Reviewing of literature about Reclaimed Asphalt Pavement, LCA and LCCA in the road pavement domain;
2. Laboratory tests on RAP;
3. Developing of an integrated approach in order to evaluate environmental and economic impact of road infrastructures in terms of GWP and costs;
4. Assessing the GWP and costs of a case study on maintenance and rehabilitation strategy of a motorway placed in Sicily (Italy).

The first objective allows to have a proper background and benchmark of the current state of the art of RAP, LCA and LCCA.

The second objective aims to mainly know an innovative material in order to be able to use it in others studies.

The third objective, according to literature, will lead to a merging technique for the evaluation of the entire process, namely from raw materials supply to final disposal, of road pavement.

The fourth objective will use the studied merging technique applying it to a real case study comparing several maintenance scenarios.

Expected results

- Environmental friendly material performance;
- Definition of integrated model;
- Calibration of integrated model.

First year course

- Review literature;
- Learning softwares: asPECT, KenPAVE;
- First results:
 - a pilot study within a Bachelor thesis entitled “The Life Cycle Assessment of bituminous mixtures for road pavement”. A study about the environmental impact caused by the production of traditional hot mix asphalt (HMA) and recycled one (HMRA) designed for road flexible pavement.

Second year course

- Mix design of bituminous mixture with RAP (Reclaimed Asphalt Pavement);
- Performance test on bituminous mixture with RAP (Wheel Tracking Test);
- LCCA implementation on RAP applications ;
- Early LCA-LCCA integrated model.

Third year course

- Study journey in Nottingham;
- Final LCA-LCCA integrated model definition;
- Drafting of the final thesis.

1.3 General approach

The method chosen to measure the global warming potential (or 'carbon footprint') of road pavements in this study is life cycle assessment. LCA was first established in the 1970s in the United States and Europe to systematically measure the environmental impact of the whole life of a product or service. The assessment is carried out from 'cradle to grave', to include all life cycle stages e.g. raw material extraction and processing, transportation, manufacturing, distribution, retail, use, and end of life disposal or recycling. An LCA conventionally

considers a number of different environmental impacts; of which GWP can be one. The methodology of LCA is scientifically robust and is supported by the International Standards Organisation (ISO), the British Standards Institution (BSI), the Department of Environment, Food and Rural Affairs (Defra), the Department for Energy & Climate Change (DECC) and the World Resources Institute (WRI) among many others [1, 2, 3].

Detractors of the LCA method point to its technicality and the heavy data and process knowledge requirements to carry out an assessment [4]. There are also a large number of methodological variables available to practitioners which adds to the complexity and increases the uncertainty in results [5].

Recent years have seen continued investigation and development of new methodologies combined with the improvement and standardisation of existing methodologies [6, 7]. In particular, GWP has broken away from full LCA through the development of GWP specific standards such as PAS 2050 and the GHG protocol [2, 3].

LCA has therefore been selected to measure the GWP of road pavements in this study. Assessments which are carried out with transparency and in accordance with the standards can produce reliable and repeatable results; of utility when addressing or investigating the environmental impacts of a product or service.

There are other methodologies used to measure the environmental impact and GWP of products and services. Methodologies such as

ecological footprinting, Environmental Impact Assessment (EIA), and a variety of certification schemes can all be selected for assessments.

The method chosen to measure the economic impact of road pavements is Life Cycle Cost Analysis (LCCA). For Federal Highway Administration (FHWA) “LCCA is an analysis technique that builds on the well-founded principles of economic analysis to evaluate the over-all-long-term economic efficiency between competing alternative investment options. It does not address equity issues. It incorporates initial and discounted future agency, user, and other relevant costs over the life of alternative investments. It attempts to identify the best value (the lowest long-term cost that satisfies the performance objective being sought) for investment expenditures” [8].

In the face of scarce funds and limited budgets, transportation officials must constantly choose the most cost effective project alternatives. As transportation agencies consistently rank among the top sectors in public spending, choosing the most cost-effective type and design of pavement while still providing a high quality of service to the traveling public is one of the most important management decisions to be made. Life cycle cost analysis (LCCA) is an essential economic evaluation tool that provides valuable guidance to transportation officials in this process.

LCCA, as well as being used as a decision support tool when selecting pavement type, is also used to assess different rehabilitation strategies within the same pavement type. The end result of a successful

LCCA is not simply the selection of one alternative over the other, but also the selection of the most cost-effective design strategy for a given situation and a greater understanding of the factors that influence cost effectiveness [9].

Road design and/or maintenance decisions have been led through the use of LCA, LCCA and pavement deterioration in terms of rutting performance [10, 11]. For this reason surface treatments were chosen according to the pavement behavior taken into account by the author. It means that having used the same pavements with the only difference consisting of wearing course material the main distress here considered is linked to such layer. For this reason the author took into account rutting performance and pertinent treatments.

Finally a method to compare several strategies is here proposed obtained merging LCA and LCCA.

The omission of the use phase, specifically rolling resistance [12] can lead to a major error in the analysis of alternative pavement activities [13], but in the present study the focus is on the merging of LCA and LCCA. As consequence of that the author does not consider the use phase.

References

- [1] ISO. “*Environmental management - life cycle assessment - principles and framework (ISO 14040:2006)*”, 2006.
- [2] BSI. “*PAS 2050:2011 specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*”, 2011.
- [3] WRI. “*Product life cycle accounting and reporting standard*”, available at: www.ghgprotocol.org/standards/product-standard, 2011.
- [4] S. Feifel, W. Walk and S. Wursthorn. “*LCA, how are you doing today? a snapshot from the 5th german lca workshop*”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, n. 15, 139–142. doi: 10.1007/s11367-009-0141-1, 2010
- [5] G. Finnveden. “*On the limitations of life cycle assessment and environmental systems analysis tools in general*”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, n. 5, 229–238. doi: 10.1007/BF02979365, 2000.
- [6] J. Minx, T. Wiedmann, J. Barrett and S. Suh. “*Methods review to support the pas process for the calculation of the greenhouse gas*

- emissions embodied in goods and services*”, Technical Report EV2074, DEFRA, www.carbonriver.com/wp-content/files_mf/1285185358Methods_PAS.pdf, 2007.
- [7] S. Suh and S. Nakamura. “*Five years in the area of input-output and hybrid LCA*”, The International Journal of Life Cycle Assessment, n. 12, 351–352, doi: 10.1065/lca2007.08.358, 2007.
- [8] Federal Highway Administration, FHWA, “*Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design – In Search of Better Investment Decisions*”, Pavement Division Interim Technical Bulletin, 1998.
- [9] P.R. Rangaraju, S. Amirkhanian, Z. Guven. “*Life Cycle Cost Analysis for Pavement - Type Selection*”, Report N. FHWA-SC-08-01, 2008.
- [10] H.M.I. Lt Col Abdul, M.M. Dadang, H. Law Tiek. “*Pavement performance model for Federal Roads*”, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.5, 428-440, 2005.
- [11] R.S. Walker, W.R. Hudson, F.L. Roberts. “*Development of a system for high-speed measurement of pavement roughness, final report*”, 1971.

- [12] T. Wang, I.S. Lee, A. Kendall, J. Harvey, E.B. Lee, C. Kim. “*Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance*”, Journal of Cleaner Production, n.33, 86-96, 2012.
- [13] N.J. Santero, E. Masanet, A. Horvath. “*Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps*”, Journal of Resources, Conservation and Recycling, n. 55, 810-818, 2011.

Literature Review

2.1. Life Cycle Assessment

Life Cycle Assessment is a methodology promoted by the United Nations Programme for the Environment and the World Summit Conference for Sustainable Development of Johannesburg in 2002. This method has been standardized with the ISO 14040.

From every previous LCA study there are important findings which can be taken as a starting point for further applying LCA to road and asphalt industry.

The LCA enables us to compare alternative designs and construction techniques in terms of their environmental impact. All the life cycle phases, inputs (energy and fuel consumption) and outputs (manufactured products, emissions and waste materials) generated are exhaustive compiled and calculated by means of a specifically-developed simple software. For instance, environmental impact of using RAP has been evaluated by means of SimaPRO , a computer program in [1]. The use of recycled materials reduces virgin material consumption, however it records a net increase in emissions and energy imputable to the need to superheat and process RAP.

Existing pavement LCAs have largely adopted the comparison of asphalt and concrete materials as the core environmental question associated with pavements, even though it represents only one of the

many different opportunities to reduce environmental impact. In fact there are many components, like traffic delay, rolling resistance, concrete carbonation, pavement albedo, lighting, leachate and end-of-life allocation, are not very often taken into account due to the knowledge that is not enough or they simply are not incorporated into the pavement LCA framework. Such gaps jeopardize the accuracy of results and defensibility of conclusions [2].

The Kyoto Protocol has introduced new variables in the sustainability analysis of any construction activity as greenhouse-gas emissions.

The existing literature establishes a foundational framework for quantifying environmental impact, but fails to deliver global conclusions regarding materials choices, maintenance strategies, design lives, and other best practice policies for achieving sustainability goals. So, functional units need to be standardized, systems boundaries expanded, data quality and reliability improved, and study scopes broadened [3].

Pavement network represents an opportunity for significant environmental improvement. Indeed, recent research suggests that if the impacts of roadway construction, operation, and maintenance were added to the operational energy use and greenhouse gas (GHG) emissions of on-road vehicles, these environmental impacts would be roughly 10% higher than what one would estimate based on vehicle operations alone [4].

It has also been established that the impacts from pavements extend far beyond the extraction and production of pavement materials [5]. For example, research involving traffic delay, vehicle-pavement interaction, and pavement albedo show promising reduction opportunities. Production of a bituminous mixture causes very different environmental consequences depending upon the materials used, typology of the plant and fuel, on-site pouring technique, transport distances and even its possible recycling [6]. Franesqui compares the production of one tonne of Hot Mix Asphalt by an ordinary coating plant considering three different scenarios. The work shows the comparison of the most sustainable options to produce hot mix asphalt. Results underline that: with regard to global emissions, the importance of modernizing production facilities using less pollutant fuels, such as natural gas and mixed cogenerating systems, has been revealed as very significant (CO₂-eq reductions from 85% to 90%); the recycling material consumption should be increased, both to avoid the generation of great amounts of waste and to reduce the finite nonrenewable raw materials; it is very important to employ the most suitable vehicles for transport. Moreover, the distances from facilities (aggregate processing and treatment, mixing plant) and roadworks increase economical and environmental costs.

Roadworks, both new construction or maintenance and rehabilitation activities, involve significant resources and entail an ever increasing environmental consumption. So, a life cycle approach is gaining ground in meeting the needs of sustainable construction [7].

Long since already LCA has been accepted and applied by a number of industries, road industries as well, to measure and compare the key life-time environmental impacts of asphalt products and laying processes [8].

Both in USA and Europe there are several resources of LCA tools, services and data [9, 10]. Pilot study in the late 1990's demonstrated that LCA can help select the environmentally preferable method for asphalt pavement treatment [11, 12, 13].

The environmental impacts from pavements are best characterized using a life-cycle assessment (LCA) approach. LCA offers a comprehensive methodology for examining the net environmental performance of products and services across a suite of environmental metrics that includes all important interactions with human and natural systems [14].

LCA is based on a standardized methodology, but the impact of the chosen method on the results has not yet been fully explored. So in [15] the study mainly illustrates the impact of the allocation methods for end-of-life recycling on the inventory of a unit process. After long time, almost 20 years, studies on LCA for road pavements [16, 17, 18, 19] there are gaps about data collection and methodological choice. Such gaps can be so grouped: life cycle stages; allocation and recycling; system boundary; feedstock energy, carbon and land use change. Among them allocation and system boundary are considered the most relevant methodological issues within LCA community [20].

2.2. Life Cycle Cost Analysis

Life Cycle Cost Analysis is a powerful tool for economic analysis of every kind of design, for instance buildings [21, 22] and pavements [23]. Such tool can be used to evaluate several design alternatives that satisfy a required level of performance. Handbook 135 [24] is a guide for understanding the life-cycle cost methodology and criteria established by the Federal Energy Management Program (FEMP) for the economic evaluation of energy and water conservation projects and renewable energy projects in all federal buildings. It allows to evaluate, relative to a building, occupant comfort, safety, adherence to building codes and engineering standards, system reliability and aesthetic consideration.

The Interim Technical Bulletin [23] is oriented to LCCA practice in pavement design. The National Highway System (NHS) Designation Act of 1995 specifically required States to conduct life-cycle cost analysis on NHS projects costing \$25 million or more. Implementing guidance was provided in Federal Highway Administration (FHWA) Executive Director Anthony Kane's April 19, 1996, Memorandum to FHWA Regional administrators.

The implementing guidance did not recommend specific LCCA procedures, but rather it specified the use of good practice.

The FHWA position on LCCA is further defined in its Final Policy Statement on LCCA published in the September 18, 1996, Federal Register. FHWA Policy on LCCA is that it is a decision support tool, and

the results of LCCA are not decisions in and of themselves. The logical analytical evaluation framework that life-cycle cost analyses fosters is as important as the LCCA results themselves. As a result, although LCCA was only officially mandated in a very limited number of situations, FHWA has always encouraged the use of LCCA in analyzing all major investment decisions where such analyses are likely to increase the efficiency and effectiveness of investment decisions whether or not they meet specific LCCA-mandated requirements.

The 1998 Transportation Equity Act for the 21st Century (TEA-21) has since removed the requirement for SHA's to conduct LCCA on high-cost NHS useable project segments.

However, the congressional interest in LCCA is continued in the new requirement that the Secretary of Transportation develop recommended LCCA procedures for NHS projects.

The Interim Technical Bulletin discusses the broad fundamental principles involved in LCCA and it presents widely accepted procedures used in setting up and conducting LCC analysis. It also discusses input parameters, the variability and inherent uncertainty associated with them, and provides recommendations on acceptable ranges for a variety of parameters. It presents examples of traditional LCCA in a pavement design setting.

The primary audience for this Bulletin is State highway agency (SHA) personnel responsible for conducting and/or reviewing LCCA of highway pavements.

Waldenmaier and Abdelrahman in their manuscript [25] evaluate performance and cost of recycled materials in infrastructure rehabilitation. The used tool for planning is LCCA. Recycled materials are crumb rubber modifier, stress absorbing membrane interface and recycled asphalt pavement. Such study shows RAP is the best solution among the all solutions considered because it allows to reduce the need for virgin material, to limit the waste and to create a sustainable road system.

A comparison between conventional pavements and asphalt rubber one has been conducted by Arizona Department of Transportation [26]. Even though typical cost of a crumb rubber modified (CRM) mix is 1.5 to 2.0 times more than a conventional mix [27]. However, the benefits of using CRM are many, and therefore, a life cycle cost analysis should be performed. Results show that an asphalt-rubber pavement would be more cost-effective than a conventional pavement with respect to agency costs as well as user costs.

The Federal Highway Administration (FHWA) has always encouraged the use of LCCA in analyzing all major investment decisions where such analyses are likely to increase the efficiency and effectiveness of investment decisions. The current FHWA position on LCCA for pavement design evolved from ISTEA 1991 [28] which required the consideration of life-cycle costing in the design and engineering of pavements, among other facilities. Other LCCA driving forces include the NHS Designation Act of 1995 (that specifically

required states to conduct LCCA and Value Engineering Analysis on NHS projects whose costs exceed a certain threshold), and TEA-21 (which removed LCCA requirements established in the NHS Act, but required the development of LCCA procedures on NHS projects) [23].

Previous studies conducted in Indiana and other states strongly suggest that more effective long-term investment decisions could be made at lower cost if LCCA were adopted properly [29, 30, 31, 32].

The study [33] consists of a review of existing methodologies and software in order to improve them and suit current and foreseeable INDOT pavement design and pavement management practice.

The Intermodal Surface Transportation Efficiency Act of 1991 (ISTEA) specifically required consideration of “the use of life-cycle costs in the design and engineering of bridges, tunnels, or pavement” in both metropolitan and statewide transportation planning [23].

In addition, the National Highway System Designation Act of 1995 required states to conduct an LCCA for each proposed National Highway System (NHS) project segment costing \$25 million or more. The National Cooperative Highway Research Program’s (NCHRP) 2003 report states that Federal Executive Order 12893, signed by President Clinton in January 1994, required all federal agencies to use a “systematic analysis of expected benefits and costs...appropriately discounted over the full life cycle of each project” in making major infrastructure investment decisions [34]

The 1998 Transportation Equity Act for the 21st Century, TEA-21, has since removed the requirement to conduct LCCA in transportation investment decision making. However, it is still the intent of FHWA to encourage the use of LCCA for National Highway System (NHS) projects.

The LCCA methodology uses an economic point in time [35]. This technique applies a financial variable called discount rate to represent the time value of the money. The discount rate used in a LCCA application can have quite a large impact on the analysis and in the conclusions that can be reached. Therefore, it is important to apply the correct discount rate for each particular decision problem. Ferreira and Santos [36] deal with discount rate sensitivity analysis by means of a system called OPTIPAV. It shows the importance of a proper choice of the discount rate value in a LCCA application. It influences all the costs that occur during the analysis period and not the initial costs (year 0).

2.3. Merging technique

System for evaluating sustainability of building, road constructions (GreenLITES, Greenroads, Envision, STEED, I-LAST and IN-VEST) [37] and system in general (for instance lighting system [38]) are present in literature.

| Rating system | Attributes |
|---------------|--|
| GreenLITES | GreenLITES was developed by New York State DOT to recognize best practices and to measure their performance by evaluating projects incorporating sustainable choices (New York State DOT 2010). There are two certification programs; i.e., a rating program for project designs and a rating program for operations. Highway construction projects are evaluated for sustainable practices on the basis of these programs, and an appropriate certification level (i.e., certified, silver, gold, and evergreen) is assigned on the basis of the total credits received (New York State DOT 2010) |
| Greenroads | Greenroads is a collection of sustainability best practices that can be applied to roadway construction (Muench 2010). Greenroads consists of required best practices and voluntary best practices. Required best practices should be satisfied as a minimum requirement, whereas voluntary best practices may optionally be considered to enhance sustainability (Muench 2010) |
| Envision | The Envision is a rating consists of five sections: Quality of Life, Leadership, Resource Allocation, Natural World, and Climate and Risk. Totally, 60 credits make up this rating system. A 2-page write-up describing each credit includes the intent, levels of achievement, metric, a description of how to achieve a higher level, documentation, and related credits (Institute for Sustainable Infrastructure 2012) |
| STEED | STEED is a checklist developed by Lochener, Inc., to rate sustainable roadways projects (Demich 2010). STEED consists of 21 elements (e.g., air quality, aesthetic, and livability). Points are awarded if applicants provide a description of the elements they select to obtain points and supporting information on how they address the selected elements (Demich 2010) |
| I-LAST | I-LAST is a rating system and guide developed by Illinois DOT to evaluate the sustainability of highway projects (Knuth and Fortmann 2010). I-LAST consists of over 150 sustainable items. The scoring process of I-LAST consists of three steps: (1) determining the items applicable to a project; (2) evaluating the total points for the achieved items; and (3) scoring by calculating the percentage of achieved points to the total available points (Knuth and Fortmann 2010) |
| IN-VEST | IN-VEST is a web-based self-evaluation tool developed by the Federal Highway Administration to measure the sustainability of highway construction (Shepherd 2010). IN-VEST consists of 68 criteria based on sustainability best practices. IN-VEST uses other tools (e.g., GreenLITES and Greenroads) as references. The measurement methods are similar to those of the LEED rating systems (Shepherd 2010) |

Fig. 2.1 - Rating systems to evaluate the sustainability of road construction [39]

They were born because of the evidence that sustainable development can be affected directly or indirectly by engineering design and construction methods [40, 41, 42]. Furthermore, the levels of emission and consumption are increasing in response to global economic growth, resulting in a condition that is unsustainable [43, 44]. This long-term unsustainability can be checked in part by altering design objectives and selecting alternative methods and materials for construction [40, 45]. Because of their size and abundance, buildings and roads are ideal targets for sustainable design and construction initiatives. Highway construction consumes significant amounts of material and energy and produces a large amount of waste [46, 47].

The separation of LCA from economic analysis has limited the influence and relevance of LCA for decision-making, and left

uncharacterized the important relationships and trade-offs between the economic and life cycle environmental performance of alternative product design decision scenarios. LCA and LCCA have many methodological differences as shown in [48]. Several approaches for linking LCA and LCCA are presented in literature. Norris [48] outlines two approaches to integrate LCA with LCCA, PTLaser and TCAce. The first is based on the models user inputs, the program calculates life cycle inventories for the modeled system alternatives (LCA results) and provides financial evaluations of all alternatives (LCC results), present valuing costs and benefits [49]. It allows to take into account two additional aspects not usually considered: uncertainty and risk. TCAce is specially designed to enable users to broaden the cost scope to include less tangible costs like those borne by parties other than the decision making company or its suppliers or customers.

Aryal [50] provides in his work an evaluation of the environmental effects, performances and life cycle cost taking into account three different maintenance techniques. The analysis is conducted by means of two Excel based program, PaLATE and Real Cost: the first one for the environmental impact and the last one for costs.

Historically, the highway construction industry has emphasized three factors: cost, schedule, and quality. These factors do not account explicitly for human demands, environmental impacts, or social responsibility risks [51]. In addition to the conventional factors, sustainable design and construction should explicitly consider the

financial, environmental, and social aspects of a project—the so-called triple bottom line [52].

Mendler and Odell [51] suggest that incorporating environmental and social aspects into design and construction projects requires realignment of the decision strategy from the conventional triangular model balancing cost, schedule, and quality to a pentagon model that also includes social and environmental aspects. ASCE [53] suggests that engineers must be responsible for project life cycle and sustainability to transition from designers and builders to leaders.

The above mentioned evaluation systems are based on rating procedures, but they are not based on standardized performance metrics. For this reason, the effect of meeting environmental targets in these rating systems cannot be quantified. Lee et al. [39] introduced a method for quantitative comparative analysis and rating of sustainable highway construction, referred to as Building Environmentally and Economically Sustainable Transportation Infrastructure-Highways (BE²ST-in-Highways).

The BE²ST-in-Highways system incorporates standardized measurement methods such as life-cycle assessment (LCA) to quantify environmental impacts and life-cycle cost analysis (LCCA) to quantify economic impacts.

Lee et al. in their application [39] analyze four potential pavement designs, a reference design and three alternatives: they are different for material used in wearing course and base layer.

References

- [1] C.D. DeDene, M. Marasteanu. “*Life Cycle Assessment of Reclaimed Asphalt Pavement to Improve Asphalt Pavement Sustainability*”, SIIV Conference, Rome, 2012.

- [2] N.J. Santero, E. Masanet, A. Horvath. “*Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps*”, Resources, Conservation and Recycling journal, n.55, 810-818, 2011.

- [3] N.J. Santero, E. Masanet, A. Horvath. “*Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review*”, Resources, Conservation and Recycling journal, n.55, 801-809, 2011.

- [4] M.V. Chester, A. Horvath. “*Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains*”, Environ Res Letts, 2009.

- [5] N.J. Santero, A. Horvath. “*Global warming potential of pavements*”, Environ Res Letts, 2009.

- [6] M.A. Franesqui. *“Life Cycle Assessment For Measuring The Environmental Effects Of The Manufacture And Construction Of Bituminous Mix Paving”*, SIIV 2007.
- [7] WSSD. *“Plan of implementation”* World summit on sustainable development. Johannesburg, 2002.
- [8] R. Bird, R. Clarke, T. Donnelly, O. Heidrich, Y. Huang. *“Life cycle and sustainability indices for road paving materials”* (unpublished report), School of Civil Engineering and Geosciences, University of Newcastle upon Tyne, 2004.
- [9] EPA. LCA resources. Available from: <http://www.epa.gov/NRMRL/lcaccess/resources.html>, 2007.
- [10] EUROPA. LCA resources directory. Available from: <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/directory.vm>, 2007.
- [11] R. Schenck. *“Using LCA for procurement decisions: a case study performed for the US environmental protection agency”* Environmental Progress, n. 19, 110–6, 2000.

- [12] H. Inamura. “*Life cycle inventory analysis of carbon dioxide for a highway construction project using input–output scheme: a case study of the Tohoku expressway construction works*”, Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, 1999.
- [13] WBCSD. “*Toward a sustainable cement industry (Substudy 6): what LCA can tell us about the cement industry*”, World Business Council for Sustainable Development; 2002.
- [14] ISO. “*Environmental management – life cycle assessment – principles and framework*”, Geneva: International Organization for Standardization. ISO 14040:2006(E), 2006.
- [15] Y. Huang, A. Spray and T. Parry. “*Sensitivity analysis of methodological choice in road pavement LCA*”, LCA in Transportation, 2012.
- [16] H. Stripple. “*Life cycle assessment of road—a pilot study for inventory analysis*”, Swedish Environmental Research Institute (IVL), Gothenburg, 2001.

- [17] U.M. Mroueh, P. Eskola, J. Laine-Ylijoki. “*Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction*”, Waste Manage, n. 21, 271–277, 2001.
- [18] H. Birgisdóttir, K.A. Phil, G. Bhandar, M.Z. Hauschild, T.H. Christensen. “*Environmental assessment of roads constructed with and without bottom ash from municipal solid waste incineration*”, Transport Res D-TR E n. 11, 358–368, 2006.
- [19] Y. Huang. “*Life cycle assessment of use of recycled materials in asphalt pavements*”, PhD, Newcastle University, 2007.
- [20] S. Feifel, W. Walk and S. Wursthorn. “*LCA, how are you doing today? a snapshot from the 5th german lca workshop*”, The International Journal of Life Cycle Assessment, n. 15, 139–142. doi: 10.1007/s11367-009-0141-1, 2010.
- [21] S.K. Fuller and S.R. Petersen. “*Life-Cycle Costing Manual*”, NIST Handbook 135, 1995.
- [22] T. Mearig, N. Coffee and M. Morgan. “*Life Cycle Cost Analysis Handbook*”, Education Support Service/Facilities, State of Alaska – Department of Education & Early Development, 1999.

- [23] Federal Highway Administration, FHWA, “*Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design – In Search of Better Investment Decisions*”, Pavement Division Interim Technical Bulletin, 1998.
- [24] S.K. Fuller and S.R. Petersen. “*Life-Cycle Costing Manual*”, NIST Handbook 135, 1995.
- [25] A. Waldenmaier and M. Abdelrahman. “*A Life-Cycle Cost Approach of Recycled Materials in Infrastructure Rehabilitation*”, Manuscript.
- [26] J.S. Jung, K.E. Kaloush and G.B. Way. “*Life Cycle Cost Analysis: Conventional Versus Asphalt-Rubber Pavements*”, 2002.
- [27] E. Hunt and W. Peters. “*Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete in Oregon: Summary Report*”, 1994.
- [28] ISTEA. “*Intermodal Surface Transportation Efficiency Act*”, 1991.
- [29] A.I. Al-Mansour and K.C. Sinha. “*Economic Analysis of Effectiveness of Pavement Preventive Maintenance*”,

Transportation Research Record 1442, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1994.

- [30] I.M. Mouaket, K.C. Sinha and T.D. White. “*Guidelines for Management of Chip and Sand Seals Coating Activities in Indiana*”, Transportation Research Record 1344, Transportation Research Board, Washington, DC, 1992.
- [31] D.E. Peterson. “*NCHRP Synthesis of Highway Practice 122: Life Cycle Cost Analysis of Pavement*”, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1985.
- [32] M.I. Darter, R.E. Smith and M.Y. Shahin. “*Use of Life-Cycle Costing Analysis as a Basis for Determining the Cost-Effectiveness of Maintenance and Rehabilitation Treatments for Developing a Network Level Assignment Procedure*”, Proceedings of North American Pavement Management Conference, Toronto, ON, 1987.
- [33] G. Lamptey, M.Z. Ahmad, S. Labi, K.C. Sinha. “*Life Cycle Cost Analysis for INDOT Pavement Design Procedures*”, Joint Transportation Research Program – Technical Report, 2005.

- [34] NCHRP. “*Bridge Life-Cycle Cost Analysis*” NCHRP Report 483, TRB, Washington, DC, 2003.
- [35] FHWA. “*Life-cycle cost analysis primer*”, Federal Highway Administration. Office of Asset Management, Washington, DC, USA, 1-25, 2002.
- [36] A. Ferreira and J. Santos. “*LCCA system for pavement management: sensitivity analysis to the discount rate*”, Proceedings of SIIV Congress, 5th International Congress – Sustainability of Road Infrastructures, 2012.
- [37] B. Yu, Q. Lu and J. Xu. “*An improved pavement maintenance optimization methodology: Integrating LCA and LCCA*”, Journal of Transportation Research Part A, n. 55, 1-11, 2013.
- [38] A.S. Ezeldin and N. Heteba. “*Life Cycle Cost and Assessment for Systems and Sources of Lighting in the Middle East*”, Proceedings of The European Conference on Sustainability, Energy and the Environment 2013.
- [39] J. Lee, T.B. Edil, C.H. Benson and J.M. Tinjum. “*Building Environmentally and Economically Sustainable Transportation*

- Infrastructure: Green Highway Rating System*”, Journal of Construction Engineering Management, n. 139, 13006-1 – 13006-10, 2013.
- [40] C.J. Kibert. “*Policy instruments for a sustainable built environment*”, Journal of Land Use and Environmental Law, n. 17, 379–394, 2002.
- [41] A. Horvath and C. Hendrickson. “*Comparison of environmental implication of asphalt and steel-reinforced concrete pavements*”, Transportation Research Record 1626, Transportation Research Board, Washington, DC, 105–113, 1998.
- [42] U.S. Environmental Protection Agency. “*Study on increasing the usage of recovered mineral components in cement and concrete projects*”, Publication EPA-530-R-08-007, Washington, DC, 2008.
- [43] T.D. Kelly. “*Raw materials and technology fuel U.S. economic growth*” Minerals Engineering, n. 54, 17–21, 2002.
- [44] U.S. Energy Information Administration. “*International energy outlook 2010 — Highlights*”, <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/highlights.html>, 2010.

- [45] P. Truitt. “*Potential for reducing greenhouse gas emission in the construction sector*”, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2009.
- [46] J.A. Gambatese. “*Sustainable roadway construction: Energy consumption and material waste generation of roadways*”, Proceedings of Construction Research Congress 183, ASCE, Reston, VA, 1–13, 2005.
- [47] American Association of State Highway, and Transportation Officials (AASHTO). “*Primer on transportation and climate change*”, <http://downloads.transportation.org/ClimateChange.pdf>, 2009.
- [48] G.A. Norris. “*Integrating Life Cycle Cost Analysis and LCA*”, Journal of LCA, n. 6, 118-120, 2001.
- [49] Sylvatica. “*PTLaser, information and user's guide*”, downloadable from <http://www.sylvatica.com/tools/htm>”, 2000.

- [50] N. Aryal. “*Environmental, performance and life cycle cost analysis of three maintenance techniques of asphalt pavements*”, 2010.
- [51] F.S. Mendler and W. Odell. “*The HOK guidebook to sustainable design*”, Wiley, New York, 2000.
- [52] J. Elkington. “*Towards the sustainability corporation: Win-win-win business strategies for sustainability development*” California Management Review, n. 36, 90–100, 1994
- [53] ASCE. “*The vision for civil engineering in 2025*” The Summit on the Future of Civil Engineering, Reston, VA, 2007.

Flexible Road Pavement

3.1. Introduction

With “road pavement” term it usually entails a suitable structure for guaranteeing driving conditions respecting safety as required by standards. Road pavements have to be considered like real structures because they are subject to different kind loads.

Road pavements have to perform three fundamental tasks:

- Guarantee to the vehicles a regular and slightly deformable rolling surface;
- Distribute traffic loads on subgrade in order to avoid deformations, because they could compromise driving comfort, cause damages for vehicles and sometimes they could be dangerous for traffic safety;
- Protect subgrade from atmospheric agent in order to prevent the road is impassable.

The combined action of traffic and weather conditions entails an obvious deterioration of the surface. This fact led road pavement specialists to search a design procedure satisfying the cost-benefit analysis, in other words it should allow to minimize costs for construction and maintenance guaranteeing good safety level for circulation.

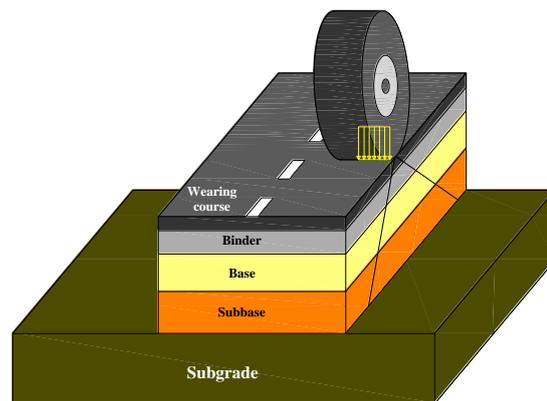


Fig. 3.1 - Road flexible pavement scheme.

The primary role of road superstructure, as above mentioned, is the distribution of traffic load on the ground in order to transfer stresses lower than critical one. For this reason it is necessary to conduct a study about pavement thickness.

Basically a road pavement consists of several overlapping layers, namely a wearing course and a load-bearing structure made of other layers.

The wearing course is the layer directly in contact with traffic loads and generally contains superior quality materials. The layers under wearing course have to keep unchanged its bearing and distributing traffic stresses on the subgrade.

The only contacts between road vehicles and pavement are the tyres and specifically their contact areas with the pavement.

In consequence the phenomena which occur in these contact areas influence vehicle performance, in areas such as stability and road handling, traffic noise generation, fuel consumption and gaseous emissions, braking distances, maintenance costs...

In particular, the load applied by a tyre can be sketch with a concentrated force that causes a compression area under the contact point and two tensile areas next to the first one. Besides, shear stresses on the top of the wearing course are opposite to the stresses on the underside. It depends on the interaction between the layers' interface.

The most important characteristics of pavements with respect to tyre-pavement interactions are their roughness, both on centimetric to millimetric scale, which we call macro-texture and on millimetric to micrometric scale, which we call micro-texture.

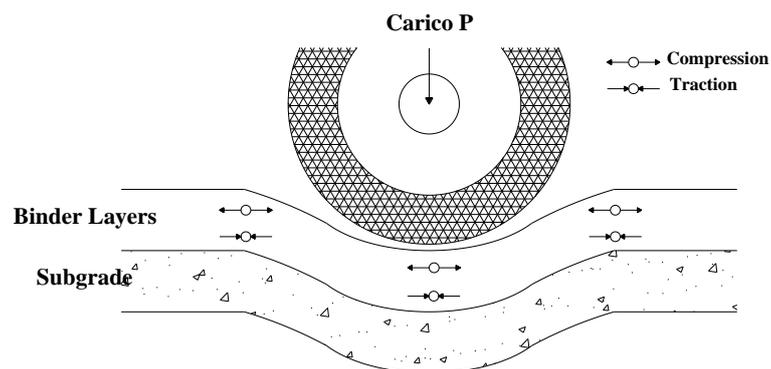


Fig. 3.2 - Tyre-pavement interactions.

The construction of several layers for a road pavement depends on both technical and economic aspects. The first has already been treated,

instead the second one is explained by the fact that the load-bearing structure can contains materials not so refined like wearing course because it is not directly in contact with traffic and atmospheric agents. Wearing course has effectively to keep for a longer time characteristics such as friction, smoothness, drainage, etc.

3.2. Classificazione delle pavimentazioni

Tralasciando le pavimentazioni di viabilità minori o temporanee, le moderne sovrastrutture si distinguono in:

– Le *pavimentazioni flessibili* (Fig. 3.3) si riconducono ad uno schema tipologico che consta di una superficie di rotolamento (strato di usura) in conglomerato bituminoso; di uno strato di collegamento (binder) intermedio ad esso in conglomerato bituminoso (generalmente in una miscela diversa dal precedente); di uno strato portante di base ancora in conglomerato bituminoso (miscela diversa dalle prime due); ed infine da uno strato di fondazione generalmente in misto granulare a contatto con il terreno di sottofondo. Date le proprietà reologiche del legante costitutivo le deformazioni ammissibili sono maggiori, rendendo così possibile un certo adeguamento della sovrastruttura ai cedimenti del sottofondo. [1];

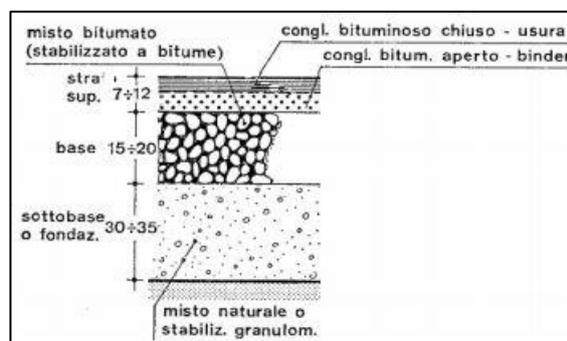


Fig. 3.3 - Sovrastruttura stradale flessibile.

- Pavimentazioni semirigide (Fig. 3.4): Quando in una pavimentazione flessibile uno degli strati portanti (base o fondazione) viene sostituito, in tutto o in parte, con una miscela di inerti e leganti idraulici [1];

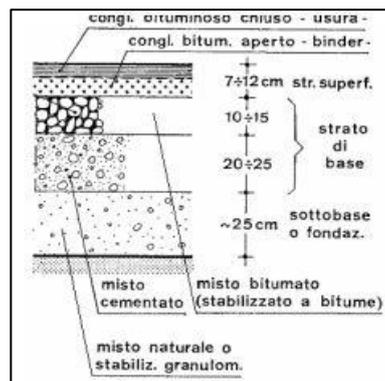


Fig. 3.4 - Sovrastruttura stradale semirigida.

- Le pavimentazioni rigide (Fig. 3.5) sono costituite da piastre in calcestruzzo semplice, armato o precompresso, poggianti su uno strato di fondazione in misto cementato. Le lastre di calcestruzzo assolvono contemporaneamente le funzioni che, nelle pavimentazioni flessibili e semirigide, hanno gli strati superficiali e di base. Hanno ridotta deformabilità, ma anche costi elevati di realizzazione e costi di manutenzione inferiori rispetto ad una soluzione progettuale che prevede pavimentazioni flessibili; inoltre data la loro elevata rigidità, la loro integrità può essere facilmente compromessa da assestamenti differenziali del piano di posa. [2];

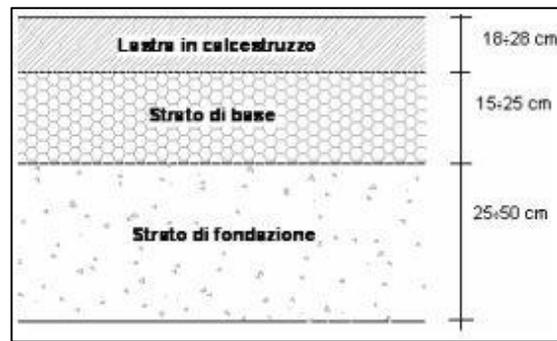


Fig. 3.5 - Sovrastruttura stradale rigida.

- Pavimentazione ad elementi (Fig. 3.6): nei centri urbani un'alternativa al conglomerato bituminoso è rappresentata dalle pavimentazioni ad elementi, in particolare quelle costituite dai masselli autobloccanti in calcestruzzo. I masselli autobloccanti sono degli elementi che, sotto l'azione del traffico, tendono ad autobloccarsi per mutua azione sulle superfici laterali o verticali. Gli strati che compongono la pavimentazione in masselli sono: uno strato di masselli autobloccanti, uno in sabbia di allettamento, uno strato di base (non sempre presente) ed uno strato di fondazione[2].

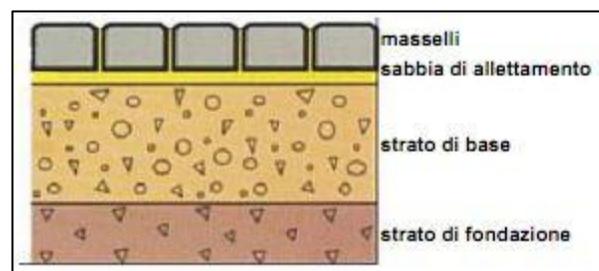


Fig. 3.6 - Sovrastruttura stradale ad elementi (in masselli).

Nel proseguimento della tesi saranno trattate esclusivamente le pavimentazioni stradali flessibili.

In Italia le pavimentazioni rigide, contrariamente ad altre nazioni in cui hanno avuto larga diffusione su strade e autostrade, non hanno trovato largo impiego: sono state, invece, utilizzate in modo estensivo le pavimentazioni flessibili.

3.3. Le pavimentazioni stradali flessibili

La caratteristica che contraddistingue le pavimentazioni flessibili consiste nella modalità di trasferimento del carico al sottofondo e nei vari strati che compongono la singola pavimentazione.

Precisamente, nelle pavimentazioni rigide il comportamento è essenzialmente flessionale: la struttura equilibra il carico chiamando in causa una porzione significativa di pavimentazione anche al di fuori dell'area di carico; in questo modo il carico viene ripartito su un'ampia zona di sottofondo. Nel caso di pavimentazioni flessibili, invece, il meccanismo flessionale è minimo, ed il carico viene trasferito al sottofondo attraverso una serie di strati di rigidità decrescente man mano che si procede dalla superficie verso il sottofondo.

Sebbene le pavimentazioni rigide siano più efficienti in termini prestazionali rispetto a quelle flessibili, risultano nel contempo più fragili. A fronte di un miglior meccanismo di equilibratura del carico,

presentano un'elevata sensibilità alle variazioni di portanza del sottofondo, essendo costituite da materiali di elevata rigidità. Quindi, anche in presenza di modeste riduzioni di portanza del sottofondo, o peggio, in caso di cedimenti/assestamenti, possono riportare gravi danneggiamenti.

Osservando nel dettaglio, nelle pavimentazioni flessibili, i veicoli trasmettono alle pavimentazioni azioni verticali, dovute al peso, e orizzontali, cioè tangenti al piano viabile: queste ultime sono conseguenza del moto del veicolo, ovvero della frenatura e in questi casi hanno la direzione del moto, ovvero derivano dall'azione centrifuga in curva e sono dirette trasversalmente all'asse longitudinale della strada. Le azioni orizzontali determinano sollecitazioni tangenziali molto forti negli strati superficiali della pavimentazione, le quali si vanno rapidamente smorzando negli strati più profondi. Per questo motivo nelle pavimentazioni flessibili si costruiscono gli strati più prossimi alla superficie (in genere non oltre due, con uno spessore complessivo variabile fra 7 e 10 cm) con miscele caratterizzate da notevole resistenza al taglio, mentre gli strati sottostanti hanno prevalente resistenza alle azioni flessionali. Il primo di questi ultimi, procedendo dall'alto verso il basso è lo strato di base, che ripartisce sul terreno di appoggio della pavimentazione le azioni verticali trasmesse dai veicoli. L'intera sovrastruttura stradale ha il compito di distribuire sul piano di posa gli sforzi, convenientemente ripartiti, dovuti ai carichi del traffico; per tale motivo essa deve avere uno spessore tale per cui le azioni trasmesse al

suolo siano sufficientemente ridotte e non superino quelle critiche del terreno.

Le pavimentazioni rigide sono costituite da una lastra di calcestruzzo di cemento, la quale, per le caratteristiche proprie del materiale, dotato e di resistenza a taglio e di resistenza flessionale, svolge contemporaneamente le funzioni sia degli strati superficiali che dello strato di base delle pavimentazioni flessibili. Al disotto di questa lastra si usa disporre anche in queste pavimentazioni uno strato di fondazione in materiale lapideo non legato, o più frequentemente, in misto cementato. Nel caso delle pavimentazioni rigide la fondazione si estende per l'intera larghezza del solido stradale.

In passato, le pavimentazioni flessibili erano costituite da una stesa di pietrisco, i cui elementi venivano legati da detriti di rocce calcaree, che appoggiavano su una fondazione in pietrame, costituita da scampoli di cava (Fig. 3.7). Era la tipica massicciata in macadam all'acqua, compattata con rulli da 14 t (con riduzione dei vuoti dal 40% iniziale al 15-25% finale) e con superficie di rotolamento in terra che successivamente venne impermeabilizzata con trattamenti superficiali aventi lo scopo di rimedio antipolvere e di miglioramento delle caratteristiche superficiali. Esistono anche massicciate a penetrazione in cui il legante penetra tra i vuoti per tutto lo spessore dello strato.

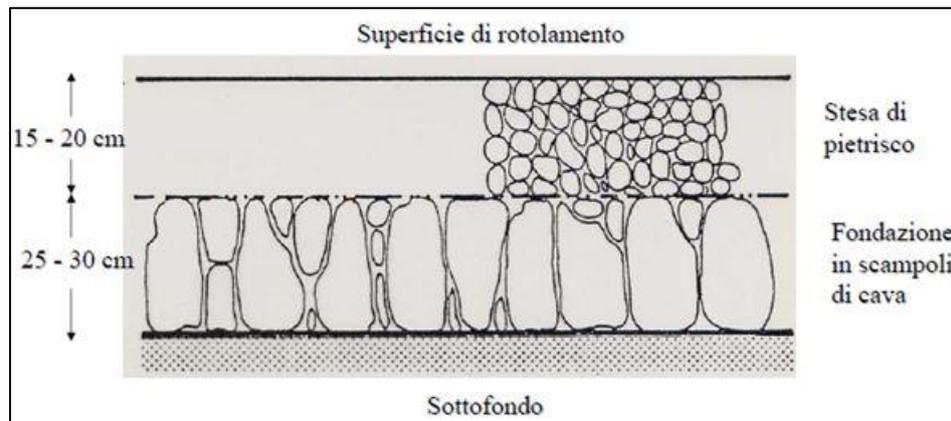


Fig. 3.7 - Massicciata in macadam.

Le moderne pavimentazioni flessibili sono costituite da una serie di strati sovrapposti, aventi caratteristiche meccaniche e funzionalità diverse tra loro, la cui interazione assolve ai requisiti di comfort e di sicurezza stradale richiesti.

Si possono distinguere (Fig. 3.8):

- **Strato d'usura:** costituito da conglomerato bituminoso a masse chiuse (bassa percentuale di vuoti), funge da superficie di rotolamento e quindi ha il compito di garantire sicurezza, confort ed economicità di marcia. Deve, pertanto, assicurare elevata e durevole aderenza e presentare buona resistenza alle azioni tangenziali ed alle deformazioni verticali permanenti (ormaie). Le proprietà di un tappeto di usura sono da mettersi in relazione con le caratteristiche mineralogiche e granulometriche degli inerti e alla proprietà del bitume. D'altronde esistono anche strati di usura

drenanti e fonoassorbenti ad elevata macrorugosità costituiti da conglomerati bituminosi aperti con leganti modificati. L'obiettivo è quello di evitare il formarsi di lame d'acqua con conseguente riduzione dell'aderenza e di ridurre il rumore prodotto dal rotolamento delle ruote dei veicoli.

- **Binder (o strato di collegamento):** costituito da conglomerato bituminoso a masse semiaperte (maggiore percentuale di vuoti rispetto allo stato di usura), con caratteristiche meccaniche lievemente inferiori rispetto allo strato superiore. Contribuisce, sia all'assorbimento delle azioni orizzontali sia, assieme allo strato di base, alle azioni flessionali indotte dai carichi. Il conglomerato bituminoso per strato di collegamento deve possedere quindi buona resistenza meccanica a taglio e a fatica (sollecitazioni flessionali).
- **Strato di base:** nelle pavimentazioni flessibili è costituito da conglomerato bituminoso a masse semi-aperte con minore quantità di bitume, maggiore porosità e caratteristiche meccaniche più basse rispetto ai precedenti strati. Deve avere elevata resistenza meccanica soprattutto nei confronti delle azioni flessionali indotte dai carichi verticali, e buona flessibilità poiché ripartisce sul terreno sottostante le azioni verticali e deve garantire un buon collegamento tra fondazione e strati superficiali.
- **Strato di fondazione:** Generalmente realizzato con misto granulare non legato le cui funzioni sono:

- *Strutturale*: esso contribuisce alla distribuzione delle sollecitazioni di compressione verticali, riducendo la loro intensità a valori compatibili con quelli che caratterizzano i materiali meno pregiati del sottofondo. Ciò dipende sia dalle caratteristiche di rigidità pressoflessionale dello strato di fondazione sia dal suo spessore.
 - *Filtro e anticontaminante*: lo strato di fondazione essendo costituito da materiali granulari e aridi, impedisce la contaminazione della sovrastruttura da parte dei materiali limosi e argillosi eventualmente presenti nei sottofondi facilmente plasticizzabili.
 - *Anticapillare*: ulteriore importante funzione svolta dalla fondazione è quella d'interruzione della risalita capillare derivante dall'eventuale presenza di falda superficiale.
 - *Antigelo*: tale funzione è direttamente connessa alla potenziale formazione di lenti di ghiaccio nell'interfaccia tra gli strati. Tale circostanza è una delle principali cause di degrado nei climi particolarmente rigidi durante lunghi periodi dell'anno.
- **Sottofondo**: indica il terreno naturale d'impianto sul quale la sovrastruttura viene costruita. Generalmente le caratteristiche fondamentali che un sottofondo deve possedere sono:
- Un'elevata *rigidità*: deve deformarsi molto poco sotto l'azione dei carichi, sia durante la costruzione (un'elevata rigidità permette di compattare bene gli strati della pavimentazione); sia

durante la fase di esercizio della strada (un sottofondo poco deformabile permette di limitare le deformazioni di flessione negli strati della pavimentazione durante il passaggio dei carichi veicolari).

- *Conservazione nel tempo* delle proprietà meccaniche.
- Sufficiente *regolarità* del piano di posa della pavimentazione: per permettere spessori costanti per tutti gli strati della pavimentazione.
- Sufficiente *impermeabilità*: per proteggere il terreno sottostante da infiltrazione di acque di pioggia, durante l'esecuzione dei lavori.

Qualora il sottofondo in esame non possieda intrinsecamente e naturalmente queste proprietà, è necessario conferirle mediante idonee azioni: bonifica del sottofondo mediante precompattazione, con miscelazione a calce o cemento ovvero con riduzione del contenuto naturale d'acqua tramite rimescolamento e stesa su superfici ampie in strato sottile, prima di essere nuovamente conferito in situ.

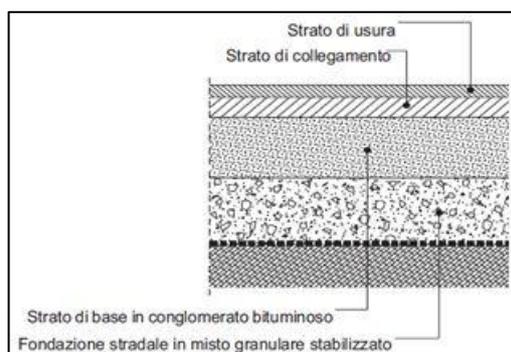


Fig. 3.8 - Strati caratteristici di una pavimentazione flessibile.

Frequentemente, strato di collegamento e strato di usura vengono identificati, nel complesso, col termine di rivestimento.

Lo spessore dei vari strati dipende da diversi fattori: la portanza del sottofondo, il tipo e spessore della fondazione stradale ed, infine, l'entità e la composizione di traffico atteso. In termini di proprietà meccaniche, gli strati più superficiali (binder e usura) presentano maggiore rigidità ed resistenza al taglio rispetto allo strato di base; tali proprietà si rendono necessarie per fronteggiare la componente radente dei carichi applicati in superficie. Nello strato di base le sollecitazioni tangenziali arrivano attenuate e quindi le sollecitazioni che è chiamato a sopportare sono essenzialmente di trazione derivanti dal comportamento flessionali globale degli strati legati.

Indicativamente, il range di variabilità degli spessori dei vari strati che costituiscono una pavimentazione di tipo flessibile è (Fig. 3.3):

- Strato di usura 3÷5 cm;

- Binder 4÷8 cm;
- Base bituminosa 10÷15 cm;
- Fondazione 20÷40 cm.

Le modalità con le quali la pavimentazione svolge i compiti descritti nel paragrafo 2.1 sono dipendenti da molteplici fattori legati essenzialmente alla progettazione della sovrastruttura stradale stessa. In particolare, si evidenzia l'importanza dei materiali utilizzati e della loro configurazione di esercizio in opera, ovvero l'insieme degli strati secondo i quali il pacchetto è organizzato ed i relativi spessori.

La scelta dei materiali da impiegare nella costruzione e degli spessori da adottare viene fatta dal progettista sulla base dei volumi di traffico previsti, delle condizioni climatiche del luogo, della vita utile richiesta alla sovrastruttura e dei fondi a disposizione dell'ente proprietario della strada, nonché della natura dell'intervento da realizzare.

3.4. I fenomeni di degrado delle pavimentazioni

I fenomeni di degrado cui è sottoposta una pavimentazione stradale sono molteplici e tra loro strettamente legati. La formazione di fessure, di avvallamenti, di ormaie, di buche, così come gli sgranamenti superficiali e gli altri fenomeni presenti nella pavimentazione, sono tutti aspetti diversi del fatto che la sovrastruttura stradale si stia degradando.

Il manifestarsi di questi fenomeni, riscontrabili direttamente sul piano viabile, indica molto spesso l'esistenza di carenze all'interno del pacchetto stradale stesso e/o del piano di posa. Le carenze sono generalmente di tipo meccanico-strutturale, per cui ad esempio, gli spessori impiegati per i conglomerati bituminosi non sono sufficienti per sopportare i carichi esterni, oppure gli aggregati scelti per il piano viabile non presentano sufficiente resistenza all'abrasione, od ancora i bitumi utilizzati rammolliscono alle temperature di esercizio. Ecco che, sotto l'effetto delle azioni esterne, il pacchetto, inteso come struttura resistente composta da più materiali, inizia a cedere, manifestando in maniera più o meno spiccata i fenomeni di degrado sopra descritti. Appare evidente come risulti assai complesso il compito di separare gli effetti delle varie azioni che concorrono al degrado della sovrastruttura ed altrettanto difficile è fornire di quest'ultimo un'identificazione oggettiva. Se, ad esempio, si pensasse di realizzare una pavimentazione stradale ex novo e di non sottoporla alle azioni del traffico, né a quelle del clima (alte e basse temperature), né ad altro tipo di azione esterna, ivi comprese la gravità ed il contatto con aria, si può ritenere che essa resti inalterata nel tempo. Ripristinando la gravità ed il contatto con aria in condizioni standard, il pacchetto cambierebbe lentamente le proprie caratteristiche per effetto dell'azione del peso proprio dei materiali e dell'ossidazione degli stessi, in particolare della matrice bituminosa.

Se poi si ammettessero variazioni climatiche dell'ambiente in cui la pavimentazione è inserita, gli effetti si sovrapporrebbero, per cui ad

esempio, la degradazione del bitume verrebbe accentuata alle alte temperature, oppure l'azione del gelo agirebbe meccanicamente sugli aggregati delle miscele, riducendone le caratteristiche di resistenza meccanica. Se, infine, si applicasse anche il traffico, ecco che la sovrastruttura stradale sarebbe sottoposta ad una serie di azioni normali e tangenziali superficiali che si ripercuoterebbero all'interno del pacchetto sollecitandolo ripetutamente. Le caratteristiche reologiche dei materiali costituenti gli strati, legate alla temperatura di esercizio ed alla velocità di applicazione dei carichi, e l'azione continuata del traffico, farebbero sì che le deformazioni indotte dai carichi si accumulino e che la capacità della sovrastruttura di resistere nel tempo alle sollecitazioni cui è sottoposta, trasferendole al sottofondo, si riduca fino al raggiungimento dei limiti di resistenza dei materiali stessi, ovvero alla loro rottura.

Si è descritto sommariamente il processo secondo il quale avviene lo scadimento delle proprietà di resistenza dei materiali che compongono il pacchetto stradale, e quindi del pacchetto stesso, inteso come struttura multistrato resistente, sotto le molteplici azioni esterne. Si è inoltre osservato come, a partire da ciò, abbiano luogo i fenomeni di degrado comunemente riscontrabili sul piano viabile. Tuttavia, seppur la loro origine sia dovuta a carenze in termini di resistenza dei materiali, essi si sviluppano in modi e tempi differenti a seconda dei casi. Per cui, ad esempio, una pavimentazione con uno strato di base sottodimensionato può presentare principalmente fessure longitudinali di tipo bottom-up, piuttosto che fessure trasversali dovute a shock termico, oppure una

pavimentazione con un bitume di usura troppo poco viscoso può evidenziare, soprattutto nella stagione estiva, ormaiamenti e refluentamenti sul piano viabile (vedi Figg. 3.9-3.10).



Fig. 3.9 - Gravi fessurazioni su pavimentazioni stradali.



Fig. 3.10 Ormaiamenti su pavimentazioni stradali.

Dal quadro introduttivo si comprende quanto sia complesso il processo di deterioramento della sovrastruttura e quanto sia difficile individuarne le cause, soprattutto se queste si trovano in profondità, all'interno del pacchetto, ed il verificarsi del fenomeno in superficie rappresenta soltanto l'atto conclusivo dell'ammaloramento. Occorre poi tener presente che, molto spesso, la contemporaneità di due o più fenomeni di degrado su una porzione di pavimentazione li amplifica vicendevolmente, suscitando il dubbio in chi deve giudicarli, su quale, dei più, sia causa o conseguenza degli altri.

Molto si è fatto per aumentare le caratteristiche di resistenza dei singoli materiali componenti gli strati affinché questi non soffrissero di fatica e si fessurassero o presentassero ormaiamenti.

Le moderne procedure di progetto delle sovrastrutture stradali flessibili, come quella presentata nella guida "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures" (NHCRP, 2004), utilizzano modelli di predizione del degrado che tengono conto di tutti i fenomeni di deterioramento che vi concorrono al fine di valutare il progetto in base a criteri di prestazione stabiliti dal progettista.

La valutazione delle performance delle pavimentazioni flessibili include quindi anche l'accumulo di deformazioni permanenti, la rottura a fatica (sia bottom-up sia topdown) e la rottura per fenomeni termici, che sono i principali fenomeni di degrado della pavimentazione stradale [9]. Tra questi verrà esaminato il fenomeno dell'accumulo di deformazione

permanente, preceduto da una spiegazione relativa alle sollecitazioni agenti sulle pavimentazioni stradali.

3.5. Le sollecitazioni agenti

Le sollecitazioni cui vengono assoggettate le pavimentazioni stradali flessibili sono essenzialmente di due tipi:

- sollecitazioni dovute al transito dei veicoli stradali;
- sollecitazioni di origine termica.

3.5.1. Sollecitazioni dovute al transito dei veicoli

In generale il carico trasmesso dalle ruote di un veicolo viene rappresentato da una pressione p (uguale alla pressione di gonfiaggio del pneumatico) uniformemente distribuita su un'area di raggio $a = \sqrt{P/\pi p}$, dove P rappresenta il carico massimo trasmesso dalla ruota sulla pavimentazione.

La pressione di gonfiaggio varia, a seconda dei veicoli da circa 1,5 Kg/cm² per quelli più leggeri, fino a 10 Kg/cm² per i veicoli pesanti.

Tenuto conto del danno che i diversi veicoli producono sulle pavimentazioni stradali, il traffico che si considera al fine di valutare le deformazioni è solo quello dei veicoli pesanti. I carichi da questi esercitati sono trasmessi alla pavimentazione stradale attraverso le ruote,

singolo o gemellate, dei differenti assali; la distanza tra due assi consecutivi può essere tale:

- che non si abbia sovrapposizione delle deformate generate nella pavimentazione ed in questo caso gli assi sono detti singoli;
- che le deformate si sovrappongano, per cui in questo caso l'insieme degli assi costituisce quello che viene detto asse tandem, se è costituito da due assi, o tridem se costituito da tre.

Per quanto riguarda l'incidenza sulle pavimentazioni stradali del passaggio dei veicoli pesanti, le osservazioni sperimentali hanno mostrato che l'aggressività degli assi tandem è minore di quella dovuta ad un pari numero di assi singoli di uguale peso (il secondo asse del tandem equivale a poco meno della metà del suo peso): si trova, infatti, che le deformazioni imposte alla pavimentazione dal secondo asse di un tandem risultano minori di quelle prodotte dall'asse di pari peso che lo precede. Questo comportamento è dovuto al fatto che, data la breve distanza fra i due assi, la deformazione prodotta dal secondo asse si sovrappone nel suo punto di applicazione alla deformazione di segno contrario ivi generata dall'asse che lo precede.

L'assimilazione dell'azione trasmessa dalla ruota ad una pressione verticale uniformemente ripartita p su un impronta circolare non consente di comprendere a pieno alcuni fenomeni di superficie che interessano il degrado delle pavimentazioni. E' evidente che nella fase di frenatura o di accelerazione, come anche in quella di inserimento in curva dei veicoli, si destano delle forze orizzontali che sollecitano la pavimentazione, dando

luogo a tensioni tangenziali che nella parte più superficiale di essa, sotto il bordo del pneumatico, possono raggiungere il valore della pressione di gonfiaggio. Il generarsi di tali sforzi di taglio riveste un ruolo non trascurabile sul degrado della pavimentazione; inoltre gli effetti dinamici dovuti alle irregolarità del piano viabile, come anche allo stesso profilo del tracciato, possono contribuire ad incrementare i carichi trasmessi dai veicoli, considerati statici.

3.5.2. Sollecitazioni di origine termica

Tra le condizioni ambientali la temperatura è quella che esercita maggiore influenza sulla durata della vita utile delle pavimentazioni flessibili, in quanto le sue variazioni influenzano i valori del modulo complesso e di quello di Poisson, cioè i parametri che caratterizzano il materiale bituminoso, e il comportamento a fatica delle miscele, oltre ad avere notevole responsabilità nel meccanismo di formazione delle ormaie.

La temperatura della superficie della pavimentazione è funzione del clima locale. Le fluttuazioni della temperatura sulla superficie tendono a seguire le fluttuazioni atmosferiche; tuttavia sono presenti differenze, anche sostanziali, a causa delle radiazioni solari, dell'evaporazione, della condensazione, delle precipitazioni e della propagazione del calore nel terreno.

L'equilibrio termico sulla superficie dipende da numerosi fattori, tra i quali la radiazione esercita un'influenza preponderante. Ne risulta

che la maggiore differenza tra la temperatura superficiale e quella dell'aria si verifica durante il periodo estivo, quando le radiazioni ad onde corte assorbite dalla pavimentazione raggiungono il loro valore massimo. Il manto d'usura è il più sensibile alle condizioni esterne ed alle eventuali variazioni, ricevendo direttamente la radiazione solare essendo ad immediato contatto con l'ambiente esterno. La superficie di una pavimentazione stradale durante le ore del giorno viene riscaldata dal sole per irraggiamento e raggiunge, quindi, abbastanza rapidamente una temperatura notevolmente superiore a quella dell'aria circostante. Durante le ore notturne il piano viabile, non più irradiato, acquista rapidamente la temperatura dell'aria e viene a trovarsi ad una temperatura inferiore a quella degli strati sottostanti, vi è perciò un trasferimento di calore dal basso verso l'alto e questo prosegue fino al mattino successivo [4].

3.6. Il fenomeno della fatica nella sovrastruttura stradale

Gli strati bituminosi costituenti una pavimentazione stradale sono soggetti all'applicazione di un carico di breve durata ogni qualvolta sul piano viabile transita un veicolo. Nel tempo, il susseguirsi e l'entità dei carichi da traffico è variabile in funzione delle frequenze di transito e delle tipologie di mezzi transitanti. Si ritiene che ad ogni passaggio corrisponda uno decadimento delle proprietà meccaniche del materiale di

strato, associato alla formazione di microlesioni nel volume dello stesso, fino alla comparsa di fessure visibili anche ad occhio nudo. L'accumulo del danno porta, nel tempo, al degrado della sovrastruttura ed alla sua perdita di funzionalità. Tale tipo di danneggiamento si manifesta usualmente sotto forma di fessurazioni degli strati bituminosi e prende il nome di "fessurazione per fatica".

Occorre precisare che l'identificazione di una soglia limite, oltre la quale la formazione di fessurazioni per fatica risulti non più compatibile con l'esercizio funzionale della pavimentazione stessa, è legata alla tipologia infrastrutturale ed al risultato di un'analisi costi/ benefici che tenga conto di diversi fattori, tra i quali risalta quello della sicurezza stradale. La presenza di fessurazioni può determinare un "effetto domino" sulle caratteristiche strutturali della sovrastruttura: la percolazione di acque nel sottofondo può ridurre la portanza; la perdita di rigidità degli strati superficiali comporta nel tempo un aumento delle tensioni negli strati sottostanti. La prestazione della pavimentazione, sotto l'azione del traffico, non dipende esclusivamente dalle caratteristiche dei materiali di ciascuno strato, ma dall'interazione tra questi.

C. L. Monismith, uno tra i più noti studiosi nel campo dei materiali bituminosi e membro onorario della AAPT americana (American Association of Physics Teachers), ha definito nel 1969 la fatica come "quel fenomeno di fessurazione del materiale soggetto a tensioni cicliche o comunque ripetute aventi un valore massimo in genere inferiore alla

resistenza a trazione del materiale stesso”. Tale definizione riassume il comportamento del materiale bituminoso in opera se si assume che le azioni del traffico siano le uniche cause generatrici di stati tenso-deformativi negli strati che costituiscono la sovrastruttura.

Tradizionalmente la fatica è stata definita da Pell (1971) come “il fenomeno della frattura dei materiali sotto un carico ripetuto o fluttuante, avente generalmente il massimo valore inferiore alla resistenza a trazione del materiale”. Questa definizione può essere impiegata anche nel caso delle pavimentazioni stradali, assumendo che l’applicazione del carico indotta dal traffico stradale sia l’unico meccanismo che possa creare stress ripetuti e, di conseguenza, deformazioni.

L’ampiezza delle deformazioni per trazione è strettamente dipendente dal modulo di rigidità dei materiali e dalla natura delle pavimentazioni in esame, ad esempio in base al tipo di conglomerato bituminoso utilizzato.

Studi scientifici, sia teorici sia condotti sul campo, hanno indicato che le deformazioni per trazione al di sotto del principale strato strutturale di una tipica pavimentazione stradale variano in un range di 30 – 200 microstrain sotto il carico di un asse standard da 80 kN. Tuttavia, le deformazioni sono generate anche da altri fattori. Per questa ragione *Read* (1996) propose la seguente definizione, incorporando tutti i possibili metodi di sviluppo della frattura: “la fatica nelle pavimentazioni bituminose è il fenomeno della fessurazione. Essa consiste in due fasi principali, l’innesco e la propagazione, ed è causata dalle deformazioni

per trazione generate non solo dal carico indotto dal traffico, ma anche dalle variazioni di temperatura e dalle procedure di costruzione". Secondo Read la struttura della pavimentazione è, infatti, soggetta a variazioni cicliche di temperatura che causano dilatazioni e contrazioni al suo interno inducendo stati tensionali coattivi nella sovrastruttura e pertanto deformazioni nel materiale. Inoltre, i *gradienti di temperatura* possono causare movimenti differenziali tra i diversi strati e questo può contribuire allo sviluppo di ulteriori deformazioni. Le *procedure di costruzione*, invece, possono provocare l'insorgere di fessure in superficie, generate durante la compattazione con rulli effettuata in condizioni di temperatura dei conglomerati bituminosi non adeguate (generalmente la compattazione del conglomerato deve essere completata quando esso si trova ancora a temperature non inferiori ai 130°C). Pertanto, si rende necessario valutare sia la fase iniziale che la fase di propagazione delle fessure, al fine di ottenere un quadro completo delle prestazioni a fatica di una pavimentazione stradale in generale e di una miscela bituminosa in particolare.

La fase iniziale, detta di innesco, consiste essenzialmente nella formazione di una diffusa rete di micro-fratture il cui effetto si traduce in una diminuzione della rigidità macroscopica (modulo). Nella seconda fase le microfratture tendono ad unificarsi formando una macro-frattura che si propaga all'interno del materiale. La formazione della macro-frattura si manifesta ad un dato valore di micro-fratturazione (livello di danneggiamento, o livello di fatica). Le due fasi vengono usualmente

modellate attraverso schemi differenti come per esempio la meccanica del danneggiamento e la meccanica della frattura lineare elastica.

Allo stato attuale, come emerso durante la sperimentazione condotta dal Comitato Tecnico RILEM nel 2003 (International union of laboratories and expert in construction materials, systems and structures), la modellazione di entrambi i fenomeni congiuntamente con un approccio unificato è ancora una sfida aperta [5]. Oltre al deterioramento derivante dall'innesco e dalla propagazione della fessura, altri fenomeni, che non devono essere interpretati come fatica, possono contribuire alla riduzione del modulo di rigidezza durante la prova. Uno di questi è l'incremento di temperatura all'interno del provino causato dalla dissipazione di energia dovuta alle proprietà visco-elastiche dei conglomerati bituminosi. Un altro fenomeno che può causare pronunciate diminuzioni del modulo durante la sollecitazione meccanica sembra essere la tixotropia del legante (fenomeno per cui il legante, per effetto di agitazione o vibrazioni, passa allo stato liquido, e torna allo stato solido quando l'azione meccanica cessa).

Il comportamento a fatica è molto sensibile alle caratteristiche del materiale, alle condizioni al contorno, alle procedure di prova ed alle tipologie di carico. Tutto ciò incrementa il numero delle variabili in gioco rendendo così ancor più complessa l'interpretazione generale dei risultati dei test.

Come descritto, il fenomeno della fatica influisce sulla rigidezza del materiale determinandone una riduzione del modulo. È importante

non scambiare la fatica con il fenomeno della deformazione permanente. In Figura 3.11 sono descritti in modo separato i due fenomeni.

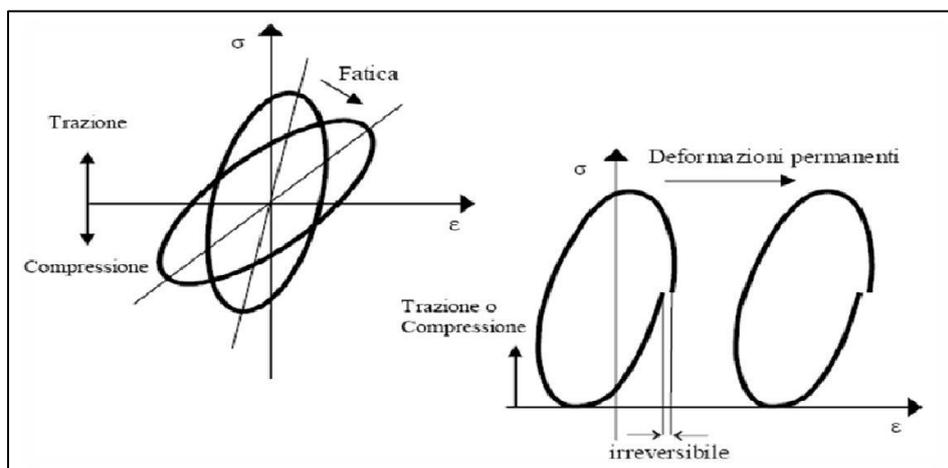


Fig. 3.11 - Differenza tra fatica e deformazioni permanenti.

Il grafico di sinistra mette in evidenza il decadimento delle caratteristiche meccaniche di un conglomerato bituminoso, sottoposto a prova di fatica, in cui si applichi un carico ciclico sinusoidale. Quello di destra, invece, descrive l'accumulo di deformazioni permanenti esibito dal conglomerato bituminoso durante prove in cui sia applicata una sollecitazione di sola compressione o di sola trazione.

Nella realtà i due fenomeni si combinano dando luogo a fenomeni più complessi le cui interazioni sono molto difficili da valutare. Pertanto si possono comprendere le ragioni per le quali non sia stato ancora stabilito un approccio unitario di riferimento.

3.6.1. La fatica: fattori endogeni

A parità di sollecitazioni esterne, siano esse dovute al traffico od al clima, conglomerati bituminosi diversi, così come sovrastrutture differenti, manifestano in modi diversi la fatica. In termini di miscela, appare del tutto ovvio che la scelta del tipo di aggregato, di legante bituminoso e di additivi può far variare la risposta del conglomerato bituminoso. Allo stesso modo le variabili fisiche delle miscele in esercizio, dovute essenzialmente alla loro posa in opera, influiscono sulla capacità che il conglomerato bituminoso stesso ha di rilassare le tensioni cui è soggetto senza fessurarsi. Pertanto, parametri come peso di volume e volume dei vuoti del conglomerato compattato agiscono direttamente sulla resistenza a fatica. In termini assoluti, la costruzione di uno strato bituminoso compatto, resistente e rigido appare come la soluzione migliore per contrastare le fessurazioni per fatica, sebbene molti ricercatori sostengano che per gli strati superficiali più sottili sia preferibile un conglomerato non troppo rigido e che si deformi elasticamente sotto gli spostamenti, talvolta significativi, imposti dal traffico.

La scelta dei materiali costituenti le miscele, delle loro proporzioni volumetriche in opera e della rigidità risultante per il conglomerato è legata anche al fenomeno delle deformazioni permanenti che, in genere, si manifesta in modo complementare alla fessurazione per fatica pur essendo esso stesso causato dalla ripetizione di applicazioni di carico. Il

fenomeno dell'ormaiamento è una forma di degrado anch'essa espressione della fatica del materiale, anche se non direttamente associabile alla comparsa di fessurazioni. La definizione di Read (Par. 3.6) della fatica dovrebbe, in tal caso, essere ampliata ulteriormente. In linea di massima si è riscontrato che un incremento del contenuto di bitume favorisce la resistenza a fatica della miscela, pur essendo necessario individuare un contenuto ottimo tale per cui il conglomerato non manifesti eccessivi ormaiamenti. Risulta di fondamentale importanza la scelta dei materiali: un bitume troppo rigido, pur efficace contro le deformazioni permanenti, può essere soggetto a rotture fragili alle basse temperature di esercizio. Anche la scelta degli aggregati è indicativa della resistenza a fatica della miscela in opera. Più che la gradazione (se variata entro i limiti di norma) e la dimensione nominale massima dell'aggregato, è la sua forma a contribuire alla resistenza: lo stesso Read ha riscontrato che aggregati eccessivamente sferici possono non contrastare significativamente la propagazione delle fratture. In termini litologici sono soprattutto durabilità, tenacia e durezza a influire sulla resistenza a fatica. Tra i materiali lapidei i fillers giocano un ruolo chiave nel determinare la risposta a fatica del conglomerato. In particolare:

- un incremento del contenuto di filler migliora, in genere, la resistenza a fatica;
- la variazione del contenuto di filler ha minori effetti di quella del bitume;

- riducendo sotto un certo valore il contenuto di filler si ha il decadimento della resistenza a fatica;
- la tipologia del filler è significativamente influente.

3.6.2. La fatica: fattori esogeni e sviluppo del danno provocato

Come già accennato, è necessario valutare sia la fase iniziale di innesco della fessurazione, sia quella di propagazione, al fine di descrivere un quadro completo della prestazione a fatica di una miscela bituminosa e della pavimentazione con essa realizzata. Secondo Di Benedetto [5] la fase dell'innesco corrisponde ad una degradazione del materiale diffusa nel suo volume: si genera una rete di micro-fessure che si estende a partire da un punto di concentrazione. A ciò corrisponde uno decadimento delle rigidità dei materiali. Nella seconda fase compare una macro-fessura frutto della coalescenza delle micro-fessure; essa si propaga nel materiale ad un gradiente dipendente da molteplici fattori (clima, costruzione, etc...) e si forma ad un determinato livello di micro-fessurazione altrimenti detto "livello di danneggiamento" o "livello di fatica".

Nella valutazione della genesi e dello sviluppo del danneggiamento fessurativo per fatica occorre tener presente ulteriori aspetti oltre all'entità del traffico ed alle variazioni di temperatura. La natura viscoelastica del bitume è trasferita direttamente al conglomerato bituminoso all'atto del suo confezionamento. Esso pertanto risente di tutti quei fenomeni che caratterizzano i leganti idrocarburici. Essendo la

fatica intuitivamente associata all'esercizio della sovrastruttura ed al lasso temporale in cui essa si trova ad operare, risulta automatico associarvi anche la nota variazione di consistenza e rigidità del conglomerato bituminoso legata all'invecchiamento ossidativo del legante. Lo studio della fatica di un conglomerato, anche se condotto per via accelerata in laboratorio, non può dunque prescindere dalle variazioni delle caratteristiche dei materiali bituminosi nel tempo non imputabili direttamente a traffico e clima.

Vi è infine il secondo aspetto riguardante lo sviluppo dei degradi fessurativi per fatica ed il rallentamento che questi possono subire a seguito dei cosiddetti fenomeni di "autoriparazione" (*healing*) del conglomerato di cui si tratterà più in dettaglio nel seguito. La natura viscoelastica del conglomerato bituminoso fa sì che temperature e tempi di sollecitazione ne regolino il comportamento non solo durante la fase di sollecitazione, ma anche nel periodo di tempo che intercorre tra due applicazioni successive. Le micro-fessure tipiche della fase di innesco possono, a seconda della temperatura e dei tempi di riposo, autoripararsi e risanare parte del danno subito ritardando, di fatto la coalescenza fessurativa.

3.6.3. Teorie di studio della fatica

Ci sono diversi modelli di fatica che sono stati trattati in tutto il mondo per poter prevedere il comportamento a fatica delle pavimentazioni stradali. Le teorie di studio sono essenzialmente 4:

- *Approccio fenomenologico;*
- *Approccio in termini di danno;*
- *Approccio basato sul meccanismo della frattura;*
- *Approccio energetico.*

3.6.3.1. Approccio fenomenologico

Strain based models (modelli basati sulla deformazione) e *strain-modulus based models* (modelli basati e sulla deformazione e sul modulo di rigidità) sono definiti modelli fenomenologici poiché propongono relazioni sperimentali che non sono state derivate da analisi teoriche relative ai meccanismi delle pavimentazioni [6].

La fessurazione longitudinale osservata sulla superficie di una pavimentazione flessibile è comunemente considerata come conseguenza di fenomeni di fatica tranne i casi in cui le cause sono diverse, per esempio: fenomeni di fessurazione termica e fessurazioni legate ad agenti atmosferici a lungo termine, precisamente fenomeni legati al meccanismo di fessurazione top-down.

Prove di laboratorio mostrano chiaramente che esiste una relazione tra la deformazione a trazione, nella fibra esterna in una prova a flessione di un travetto, e la resistenza a fatica. Quest'equazione sperimentale, determinata in laboratorio, è stata estesa alle pavimentazioni, proponendo una relazione tra la deformazione a trazione nella parte inferiore dello strato di conglomerato bituminoso (ϵ_0) e il numero di cicli di carico che determina il fenomeno della fessurazione sullo strato superficiale della

pavimentazione (N_f). Questa relazione è stata proposta da Pell nel 1987 nella seguente forma [3]:

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \right)^{K_2}$$

In cui:

- N_f è il numero dei cicli di carico a rottura per un dato valore di tensione iniziale;
- ε_i è la deformazione di trazione iniziale;
- k_1, k_2 sono coefficienti relativi al materiale.

Monismith nel 1985 ha dimostrato che conducendo prove a deformazione controllata si osserva che miscele con rigidità maggiore hanno una vita a fatica più breve. Per tale motivo ha modificato l'espressione di Pell per tenere conto di ciò:

$$N_f = a \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^b \left(\frac{1}{S_0} \right)^c$$

In cui:

- N_f è il numero dei cicli di carico a rottura;
- ε_i è la deformazione di trazione;
- S_0 è la rigidità della miscela;
- a, b, c sono coefficienti relativi al materiale.

Sebbene ampiamente utilizzato, l'approccio fenomenologico non fornisce un meccanismo di accumulo del danno nella miscela sotto un carico ripetuto. Inoltre è stato dimostrato (Carpenter et al, 2003) che il danno accumulato osservato, trattato con una relazione lineare tra vita a

fatica e deformazione, non è corretto per condizioni di carico con bassi livelli di deformazione.

L'approccio tradizionale, inoltre, non tiene conto della complessità di alcuni meccanismi interni alle miscele bituminose, quali ad esempio la redistribuzione delle tensioni e l'healing (autoriparazione). Questi meccanismi sono noti per avere un effetto significativo sul comportamento a fatica dei conglomerati bituminosi.

È quindi auspicabile studiare il comportamento a fatica dei conglomerati bituminosi per uso stradale con approcci che siano indipendenti dalla modalità di carico e dai materiali e con la capacità di prendere in considerazione il fenomeno di autoriparazione.

3.6.3.2. Approccio in termini di danno

Lo studio della fatica dei materiali per mezzo del concetto di danno o danneggiamento ha origine con la nota espressione di accumulo del danno proposta nel 1945 dal meccanico M. Miner, utilizzata per descrivere come i vari livelli di carico reali contribuiscano al danneggiamento del materiale.

Il danno è calcolato come rapporto tra il numero previsto di ripetizioni del carico e il numero massimo di cicli di carico che la pavimentazione può sopportare per un dato livello di danneggiamento. Teoricamente, la fessurazione per fatica dovrebbe avvenire per un valore di danno accumulato pari ad 1.

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i}$$

In cui:

- D è il danno;
- T è il numero dei periodi considerati;
- n_i è il numero di cicli di carico nel periodo i;
- N_i è il numero di cicli di carico a rottura nel periodo i.

L'approccio in termini di danno deriva dai modelli costitutivi del danno stesso. Un modello costitutivo è fondamentalmente un modello matematico che fornisce una relazione tra i parametri del modello e le proprietà del materiale in accordo con i principi meccanici. Il comportamento dei provini di c.b. sotto carico è stato ricondotto a tre meccanismi principali: viscoelasticità lineare, danno per fatica e healing dei micro-danni.

Il modello costitutivo alla base di questo approccio utilizza una sola variabile, la rigidità S_m , per descrivere il danno, in quanto non fa distinzione tra danno dovuto alla frattura o danno derivato dall'evoluzione di altre forme, quali ad esempio la deformazione plastica. L'espressione che formalizza la relazione costitutiva (Little et al, 2001), senza considerare variazioni di temperatura, è:

$$\sigma = \sigma(\varepsilon^R, S_m)$$

In cui:

- σ è la tensione;
- ε^R è la pseudo deformazione;
- S_m è la variabile di danno, rigidezza.

Ciò suggerisce che il danno può essere correlato con la variazione di rigidezza del materiale. Quindi, in questo approccio tutte le variazioni di rigidezza sono considerate danni. L'espressione è la seguente:

$$\sigma = I(\varepsilon^R)[F + G + H]$$

In cui:

- I è la rigidezza iniziale;
- F è una funzione di danno che consente correzioni in funzione delle variazioni di pendenza (e, quindi, della rigidezza) dei cicli di isteresi nel piano tensioni-deformazioni;
- G è una funzione di isteresi che permette di delineare il percorso di carico e scarico;
- H è una funzione di healing che rappresenta la variazione di rigidezza in funzione del periodo di riposo (rest period).

Poiché il modello costitutivo è complicato da applicare, Kim et al (1997) hanno sviluppato un modello continuo, basato sul principio che il campione subisce un danno che non è influenzato dalle proprietà del materiale. Il modello continuo analizza le microfessure nelle miscele

bituminose sotto condizioni di carico reali e considera, al tempo stesso, l'healing. Ciò consente di spiegare il fenomeno del danno legato alla fatica in modo innovativo rispetto agli approcci tradizionali (approccio fenomenologico).

Il modello può essere utilizzato per valutare l'effetto dell'healing impostando durante la prova durate differenti di rest period, sia in prove a tensione controllata che a deformazione controllata.

Tuttavia, il modello mostra anche alcune deficienze: considera solo micro fessurazione nelle miscele bituminose, quindi non descrive il comportamento di propagazione della fessura dopo che viene raggiunta la fase di macro-cracking.

3.6.3.3. _Approccio basato sul meccanismo della frattura

La teoria meccanicistica della fessurazione individua nel processo di propagazione della lesione e in particolare nella sua ampiezza la ragione del fenomeno.



Fig. 3.12 - Teoria meccanicistica [7].

Come mostrato in figura 3.12, la teoria meccanicistica della fessurazione può essere caratterizzata principalmente da due valori di

ampiezza della fessura. Il primo valore caratteristico è L_0 . Questo valore è un limite per cui al di sotto di esso il problema, e quindi la propagazione di un eventuale fessura, non sussiste. Per valori maggiori di L_0 , il passaggio dei carichi in corrispondenza di una fessura induce all'interno del conglomerato delle tensioni che riducono la resistenza del conglomerato stesso e l'ampiezza della lesione tende ad aumentare sino a raggiungere un valore critico L_{crit} .

Quando il valore di L_{crit} è stato raggiunto la fessura si propaga verso l'alto (fenomeno Bottom-Up), il materiale risulta essere snervato e la propagazione della fessura è pressoché spontanea.

L'effetto macroscopico, ovvero il degrado, sarà visibile soltanto alla fine del processo.

Generalmente, la zona critica della sovrastruttura corrisponde alla regione dove è massima la concentrazione degli sforzi, in particolare all'interfaccia tra due strati diversi; l'interfaccia rappresenta la superficie di confine tra strati che, soprattutto in profondità possiedono un elevato differenziale di resistenza meccanica, e quindi generano una superficie di discontinuità della sovrastruttura intrinsecamente più aggredibile dalla sollecitazione di flessione.

La legge che meglio esprime e traduce la teoria meccanicistica della fessurazione causata da sollecitazioni cicliche e simmetriche, è quella proposta da Paris – Erdogan, nel 1963. Considerando un elemento strutturale di altezza h e larghezza t nel quale è presente, per tutta la

larghezza, una fessura ampia l , soggetta a sollecitazioni cicliche e simmetriche rispetto ad essa, la legge di propagazione è data da:

$$\frac{dl}{dN} = AK^n$$

In cui:

- l è l'ampiezza della fessura;
- N è il numero di cicli;
- K è il fattore di intensificazione degli sforzi;
- A , n sono costanti funzione dei materiali e delle condizioni ambientali.

Integrando l'espressione generale precedente, si determina il numero di cicli N che porta al raggiungimento dell'ampiezza critica superata la quale avviene la propagazione spontanea. Se si definisce tale valore come il numero di cicli a rottura, si ha:

$$N_c = \int N(l) dl = \int_{l_0}^{l_{crit}} \left(\frac{l}{AK^n} \right) dl$$

In cui:

- l_0 è la lunghezza iniziale della fessura;
- l_{crit} è la lunghezza critica della fessura che porta all'instabilità, valore oltre il quale la fessurazione è spontanea, e cioè indipendente dai carichi.

Poiché il processo meccanico della fatica è particolarmente complesso e la teoria meccanicistica mal si presta ad una trattazione

tecnica rappresentativa del fenomeno (ardua definizione quantitativa dei parametri in gioco) si preferisce affrontarlo ricorrendo a metodi sperimentali in laboratorio, con i quali pervenire alla formulazione di leggi con le quali definire il valore di resistenza. Tale valore è identificato dal numero di cicli di sollecitazione N in corrispondenza del quale la grandezza meccanica di riferimento di resistenza meccanica ϵ (σ), misurata dal dispositivo sperimentale, aumenta (diminuisce) di una certa aliquota, esso è determinato sperimentalmente tramite prove a tensione controllata o a deformazione controllata.

Successivamente è stato osservato che l'espressione 3.6 non era sufficiente per descrivere al meglio il fenomeno, quindi è stata fornita un'ulteriore espressione da Majidzadeh et al (1997):

$$\frac{dl}{dN} = A_1 K_{IC}^2 + A_2 K_{IC}^4$$

In cui:

- $A_1(x10^{10}) = 7.02 + 77.9(1000\sigma_t/E^*)^2 - 6.09 (K_{IC}/1000)^3$;
- $A_2(x10^{16}) = 31.36 - 1132.4(1000\sigma_t/E^*)^3 - 43.32(K_{IC}/1000)^3$;
- σ_t = resistenza a trazione;
- E^* = modulo complesso a 10 Hz (psi);
- K_{IC} = resistenza alla frattura (lbs/in^{1.5}).

Altri metodi più recenti sulla meccanica della frattura sono stati presentati da Schapery (1982), Ramsamooj (1991), Molenaar (1984) e Lytton (1993, 2000).

La legge fondamentale della meccanica della frattura proposta da Schapery (1984) è:

$$2\gamma_h = E_R D_h(t_\alpha) H_V$$

In cui:

- γ_h è l'energia di densità superficiale della superficie della fessura;
- E_R è una costante arbitraria;
- $D_h(t_\alpha)$ è la deformazione per compressione di un materiale in corrispondenza del tempo t_α , che è il tempo richiesto affinché la fessura di lunghezza α si richiuda;
- H_V è l'integrale dell'healing. Rappresenta la variazione di energia di deformazione dissipata per unità di superficie di area soggetta ad healing da un ciclo di carico di compressione a quello successivo.

Questa legge è usata per descrivere la percentuale di frattura e di healing della microfessura basata sulle proprietà fondamentali della miscela e dei componenti. Utilizzando questa legge, Schapery (1988) ha sviluppato un modello di healing per un materiale con comportamento viscoelastico lineare ed isotropo assumendo forze all'interfaccia della fessura di attrazione e di carico applicato. Questo modello ha mostrato una relazione per il bilancio di energia: l'energia ceduta sul lato destro dell'equazione è assorbita dalla superficie della fessura appena creata e presente all'altro membro dell'equazione:

$$h_2 = \left[\frac{2\gamma_m E^R D_{1c} \Gamma_h}{(1 - \nu^2) c_m^{1/m_c} H_\nu} \right] \beta$$

In cui:

- E_R è un modulo di riferimento, una costante dovuta alla trasformazione della tensione;
- ν è il coefficiente di Poisson;
- D_{1c} è la deformazione per compressione costante (D_0 è posta pari a zero);
- H_ν è l'integrale dell'healing;
- Γ_h è l'energia della superficie umida;
- m_c è la pendenza della curva di creep;
- C_m, γ_m sono costanti del modello sperimentale;
- B è la dimensione dell'area limitrofa alla fessura autoriparata;
- H_2 è la percentuale di healing a lungo termine.

L'equazione di Schapery rappresenta una relazione diretta tra energia di densità superficiale e la percentuale di healing della micro fessura, quindi ciò significa che ad una maggiore energia di densità superficiale corrisponde un maggior potenziale di healing, a parità di altri fattori.

3.6.3.4. Approccio energetico

Nel presente lavoro di tesi si è deciso di dedicare un intero paragrafo all'approccio energetico per sottolineare la tendenza, che si è

sempre più affermata in quest'ultimo decennio, di rappresentare in maniera univoca il comportamento a fatica dei conglomerati bituminosi. Ciò ha condotto allo studio di approcci innovativi, già proposti a livello mondiale, da applicare, per mezzo delle tecniche flessionali, ai materiali indagati.

Le basi dell'approccio energetico proposte da Carpenter e Monismith costituiscono le alternative ai metodi tradizionali, allargano la caratterizzazione ai fenomeni dell'autoriparazione dei conglomerati (healing) ed all'identificazione degli stati tenso-deformativi ai quali la resistenza a fatica si protrae nel tempo grazie ad una sopportazione del danneggiamento intrinseca del materiale. L'applicazione di tali concetti alle pavimentazioni stradali supera i criteri di progettazione empirico-meccanicistici proponendo non solo la caratterizzazione prestazionale di laboratorio dei materiali, ma anche la quantificazione dei limiti di sollecitazione maggiormente sopportabili che, in relazione agli spessori degli strati della sovrastruttura, ne accrescono la vita utile.

Quando un materiale è soggetto ad un carico esterno, in un piano tensione-deformazione l'area sottesa dalla curva rappresenta l'energia dissipata (Fig. 3.13).

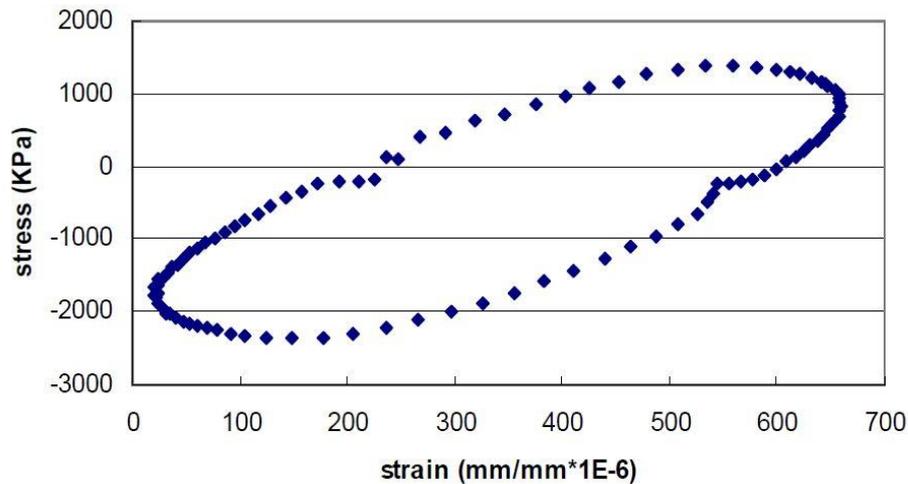


Fig. 3.13 - Ciclo di isteresi nel piano sforzo-deformazione (un ciclo di carico), prova a deformazione controllata.

Ciò che si osserva in figura si verifica nei materiali non puramente elastici, ovvero quando i percorsi di carico e scarico non si sovrappongono e, quindi, si ha la dissipazione di energia. Questo fenomeno si chiama isteresi e l'area sottesa dal percorso di carico e scarico indica la quantità di energia dissipata in un singolo ciclo di carico. Lo studio della natura della dissipazione dell'energia permette di valutare la resistenza a fatica di un materiale, poiché sono strettamente legati.

La revisione della letteratura disponibile relativa ad una quantità significativa di prove, condotte su materiali di varia natura, quali legno, vetro, polimeri, su come applicare l'approccio energetico contribuisce a fornire una migliore comprensione del meccanismo di dissipazione

dell'energia e a fornire le linee guida per la sua applicazione nello studio della fatica negli HMA (Hot Mix Asphalt).

3.6.4. Apporti scientifici all'approccio energetico

Shivakumar (1987) ha studiato la dissipazione di energia associata all'estensione di una fessura in un materiale elasto-plastico. Ha osservato che la propagazione della fessura incrementa l'energia dissipata e genera nuove superfici di rottura. Egli ha dimostrato che l'energia dissipata complessivamente è somma di tre contributi:

1. l'energia di separazione della fessura (energia spesa nella creazione di una nuova superficie lesionata);
2. energia dissipata durante la plasticizzazione;
3. energia di deformazione residua.

Secondo Erberik e Sucuoğlu (2004) durante il fenomeno di ammaloramento il materiale non riesce a mantenere costante l'energia dissipata sotto l'azione di carichi ciclici e, infatti, si osserva una riduzione di energia dissipata all'aumentare del numero di cicli. Pertanto, la capacità di dissipare energia può essere impiegata come misura del deterioramento del materiale.

Erberik ha elaborato una procedura basata sulla teoria del danno per lo studio del danno strutturale sotto carichi esterni. Questa procedura calcola un indice di danno stimando un parametro della sovrastruttura quando essa si trova nella configurazione iniziale non danneggiata e confrontandolo con il valore calcolato per la medesima struttura nel suo

stato di danno. Come parametro si può prendere in considerazione, indifferentemente, la rigidezza, la forza o la capacità di dissipare energia per valutare il livello di danno. L'indice di danno può essere calcolato con l'espressione proposta da Powell e Allahabadi (1988):

$$\delta = 1 - \frac{P_d}{P_0} = \frac{P_0 - P_d}{P_0}$$

In cui:

- δ è l'indice di danno;
- P_d è il valore del parametro strutturale nello stato di danno;
- P_0 è il valore del parametro strutturale nella configurazione iniziale non danneggiata.

L'indice di danno, calcolato per ogni ciclo di carico, indica quanto danno si produce ad ogni ciclo nel materiale.

Il ricorso all'energia di dissipazione come parametro della procedura e il calcolo dell'indice di danno per ogni ciclo di carico nella prova a fatica rendono il metodo di Erberik molto simile all'*approccio RDEC (Ratio of Dissipated Energy Change)* proposto da Carpenter [8].

Un fattore da prendere in considerazione nella trattazione della dissipazione dell'energia è lo smorzamento che, nei materiali visco-elastici, comporta proprio la dissipazione dell'energia. Per effetto dello smorzamento una parte dell'energia meccanica dissipata viene trasformata in calore, quindi si riduce il danno per fatica nel materiale,

poiché, tale energia dissipata e convertita in calore, dovrebbe essere eliminata dal calcolo totale di energia dissipata che produce rottura per fatica.

Il concetto di energia dissipata collegato alla fatica negli HMA è oggetto di diverse trattazioni.

3.7. La deformazione permanente del conglomerato bituminoso

Il conglomerato bituminoso, come già visto in precedenza, è un materiale polifasico costituito da una miscela di inerti (fase solida), bitume (fase variabile da liquida a solida in funzione della temperatura) e con la presenza di vuoti (fase gassosa). La risposta alle sollecitazioni è quindi molto complessa e variabile in funzione della composizione e soprattutto della temperatura. Dal punto di vista reologico il conglomerato presenta aspetti combinati di mezzo elastico, plastico e viscoso.

Dal punto di vista deformativo non è sempre facile distinguere le deformazioni plastiche da quelle viscoso; le prime rappresentano le deformazioni residue quando si annulla il carico, nelle seconde interviene il tempo, cioè esse continuano anche dopo che la sollecitazione viene a cessare. I risultati delle ricerche hanno mostrato che le pavimentazioni flessibili possono comportarsi, sotto l'azione dei carichi ripetuti, in due modi distinti:

- con deformazioni, dopo il definitivo assestamento, di tipo reversibile (deformazioni elastiche);
- con deformazioni visco-elastiche, con un aumento progressivo delle deformazioni residue.

Durante l'applicazione della forza il conglomerato bituminoso sviluppa quindi una risposta elastica istantanea seguita da una

deformazione crescente nel tempo. Dopo la rimozione del carico la miscela restituisce le componenti elastiche istantanea e ritardata, conservando una deformazione residua irreversibile. Tale deformazione residua, accumulata nel materiale sotto l'azione di un carico ciclico, produce il fenomeno dell'ormaiamento (vedi Figg. 3.14-3.15) [10].

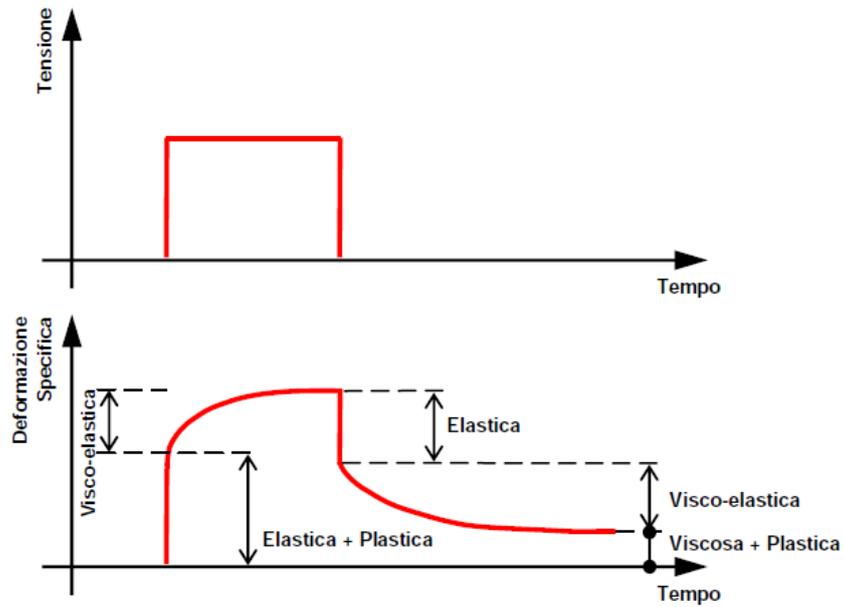


Fig. 3.14 - Risposta deformativa del conglomerato bituminoso sottoposto ad un carico di tipo statico.

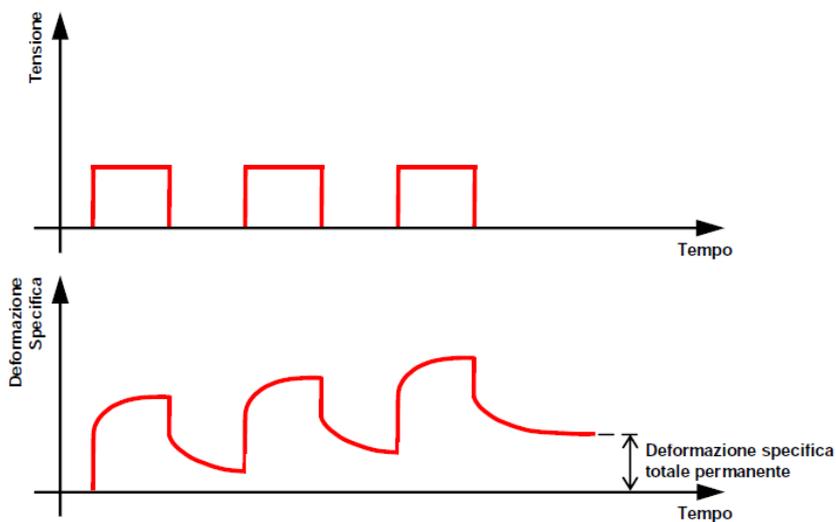


Fig. 3.15 - Accumulo delle deformazioni residue del conglomerato bituminoso sottoposto ad un carico ciclico.

L'accumulo di deformazioni permanenti nei conglomerati bituminosi a seguito del ripetuto passaggio dei carichi veicolari è una delle più comuni cause di ammaloramento delle pavimentazioni stradali. Esso può portare infatti alla formazione di ormaie, con la conseguente riduzione delle prestazioni funzionali e del livello di sicurezza intrinseco dell'infrastruttura.

L'influenza negativa di tali degradazioni sul comfort e sulla sicurezza degli utenti induce a concepire strutture stradali le cui caratteristiche di resistenza si mantengono al di sopra di prefissate soglie, in relazione alla durata di servizio della sovrastruttura [11].

3.7.1. La formazione di ormaie

L'ormaiamento o *rutting* è una depressione superficiale lungo le traiettorie della ruota, che si manifesta in maniera più o meno accentuata in quasi tutte le pavimentazioni flessibili. L'ormaiamento è causato da deformazioni, che possono essere di tipo anelastico o di tipo plastico, in uno o in tutti gli strati della pavimentazione e del sottofondo.

Il degrado da deformazione permanente si verifica in genere nei primi anni dopo la costruzione. Questo degrado si manifesta attraverso formazione di ormaie lungo la traiettoria della superficie stradale maggiormente battuta dai veicoli pesanti. Si tratta di degrado che di solito si verifica in climi caldi e dove è presente un lento movimento di mezzi pesanti. L'ormaia è a volte accompagnata da rifluimenti ai lati del solco, derivanti dalla plasticizzazione dei materiali bituminosi.

La larghezza e la profondità del profilo dell'ormaia, dipendono molto dalla struttura della pavimentazione (spessore dello strato, qualità dei materiali), dal volume e dalla composizione del traffico, nonché dalle condizioni ambientali. La formazione delle ormaie risulta particolarmente rischiosa per i veicoli in transito soprattutto dopo un evento meteorico, infatti il solco racchiudendo al suo interno l'acqua, crea le condizioni per i fenomeni di aquaplaning; inoltre, l'evolvere della formazione dell'ormaia aggrava le condizioni di comfort e di sicurezza degli utenti.

L'ormaiamento si può classificare in tre diverse tipologie a seconda delle cause che lo determinano e dagli strati in cui si manifesta:

- **Addensamento monodimensionale o compressione verticale** (vedi Fig. 3.16). L'affondamento (rut depth) causato dal materiale addensato si manifesta attraverso una depressione in prossimità del centro della ruota. L'addensamento del materiale è generalmente causata dalla eccessiva presenza di vuoti d'aria o dall'insufficiente compattazione dopo la stesa degli strati della pavimentazione. Si verifica dunque un ulteriore addensamento degli strati ad opera del traffico veicolare [4];

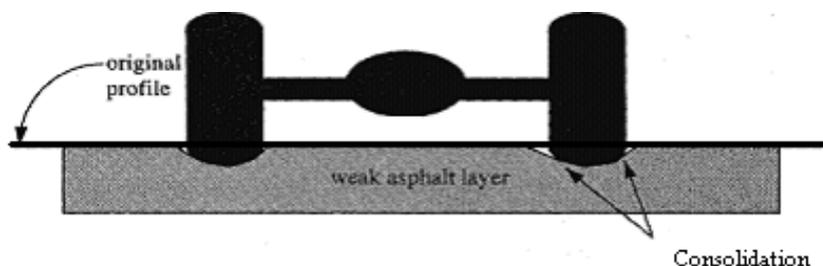


Fig. 3.16 - Addensamento monodimensionale.

- **Rifluimento o rigonfiamento laterale** (vedi Fig. 3.17). L'affondamento è causato dal rifluimento laterale di materiale che genera una depressione in prossimità del centro della traiettoria della ruota con formazione di gobbe su entrambi i lati della depressione (profilo a W). Il rifluimento laterale è causato da un'adeguata resistenza a taglio o da un'insufficiente volume dei vuoti negli strati legati. Strati legati che presentano un volume dei vuoti inferiore al 2% a fine costruzione sono

suscettibili a rifluimento laterale, perché la bassa percentuale di vuoti consentono al bitume, sottoposto ad elevate temperature soprattutto durante la stagione estiva, di comportarsi come un lubrificante piuttosto che come un legante [4].

Tale fenomeno si verifica prevalentemente sulle rampe, nei pressi degli incroci, in curva, nei luoghi in cui la velocità dei mezzi pesanti è bassa e dove le sollecitazioni tangenziali, che si sviluppano tra pneumatico e pavimentazione, agiscono per un tempo abbastanza lungo [11];

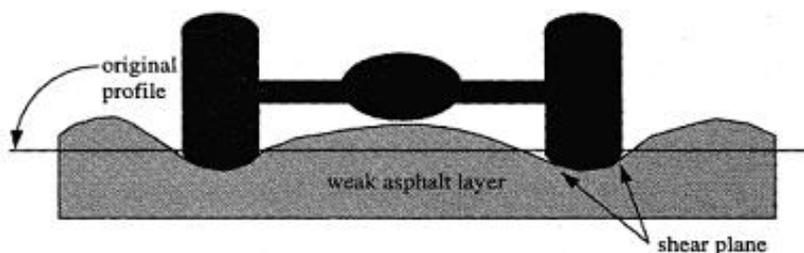


Fig. 3.17 - Rifluimento laterale.

- **Deformazione meccanica o strutturale** (vedi Fig. 3.18). Un terzo tipo di ormaiamento è l'addensamento e/o movimento laterale dei materiali al di sotto degli strati legati. La deformazione meccanica è il risultato di subsidenza nello strato di base o nel sottofondo ed è solitamente accompagnata da rotture longitudinali causate da una maggiore rigidità degli strati legati rispetto agli strati sottostanti. Queste fessure longitudinali in genere si verificano nel centro e lungo i bordi esterni delle

carreggiate [4]. In sostanza è dovuta a sollecitazioni eccessive indotte dai carichi che vanno oltre la resistenza dei materiali; le impronte che ne risultano sono larghe e senza rigonfiamenti laterali (profilo a V) [11].

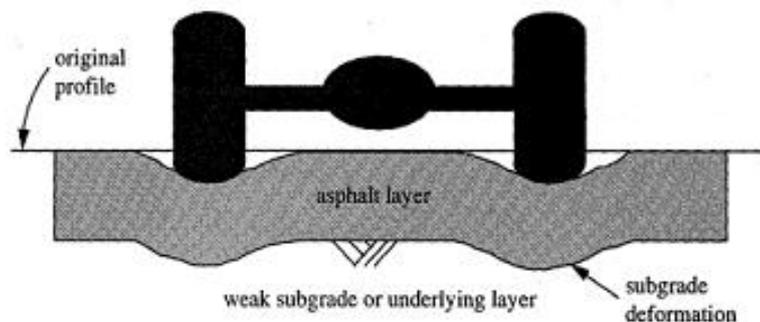


Fig. 3.18 - Deformazione meccanica.

3.7.2. Fenomeni connessi alla presenza di ormaie sul piano stradale

L'ormaiamento è un fenomeno inevitabile in quanto è causato dallo scorrimento viscoso che il conglomerato bituminoso manifesta a seguito di azioni dinamiche applicate.

È un fenomeno che pregiudica la sicurezza stradale comportando una notevole riduzione degli indicatori di stato delle sovrastrutture in termini, soprattutto, di regolarità.

I fenomeni connessi alla presenza di ormaie sul piano stradale sono di seguito elencate:

- effetto rotaia;
- accumulo d'acqua meteorica sul piano viabile;
- decadimento della funzionalità della sovrastruttura;

- discomfort di guida.

3.7.2.1. Effetto rotaia

L'effetto rotaia è così chiamato perché l'effetto causato dalle ormaie sui veicoli è paragonabile a quello causato dalle rotaie sui treni. Esse hanno infatti la funzione di guida vincolata. I movimenti di un veicolo che transita su una pavimentazione regolare sono comandati attraverso il volante in maniera lineare e senza alcuna brusca reazione dovuta al manto stradale. In presenza di ormaie il veicolo è soggetto a bruschi spostamenti trasversali con conseguente perdita del controllo del veicolo. In questo caso i movimenti del volante non sono più governati dalla volontà del guidatore, in quanto condizionati dalle reazioni imprevedibili che la pavimentazione trasferisce al veicolo [11].

3.7.2.2. Accumulo di acqua meteorica

Le ormaie presenti sul piano viabile fungono da contenitori di acqua formando così un velo d'acqua negli strati superficiali della sovrastruttura. Questi accumuli sono molto pericolosi perché causano l'insorgere del noto fenomeno dell'aquaplaning, cioè la perdita completa del contatto ruota-pavimentazione con conseguente riduzione, parziale o totale, dell'aderenza e, quindi, del controllo del veicolo.

La formazione degli strati d'acqua, che si verifica essenzialmente all'interno dei solchi, è dovuta alla conformazione che gli stessi presentano. Nel caso di solchi larghi lo spessore del velo idrico è

distribuito su una superficie maggiore, e quindi il pericolo generato è maggiore in conseguenza del fatto che la perdita di aderenza può interessare tutte le ruote del veicolo causando la perdita di controllo totale. In quelli stretti, il velo è concentrato su una superficie più ristretta, causando perciò un rischio più contenuto, anche se gli spessori dei veli idrici sono maggiori rispetto al caso precedente [11].

3.7.2.3. Decadimento della funzionalità della sovrastruttura

Le variabili portanza, aderenza e regolarità sono strettamente interdipendenti. È noto che anche minimi difetti di portanza provocano inevitabili deformazioni in tutti gli strati della pavimentazione, causando, il conseguente decadimento della funzione legata alla regolarità, e di quella legata all'aderenza.

I valori di queste tre grandezze sono funzioni che, al trascorrere del tempo, decrescono con una velocità sempre maggiore a causa di motivi a volte apparentemente diversi tra loro, che insieme condizionano la funzionalità delle pavimentazioni durante il loro periodo di vita utile.

Nel tempo, infatti si hanno:

- variazioni della portanza dei terreni di sottofondo a causa di fenomeni di affaticamento e/o di particolari condizioni ambientali, quali variazioni termiche, variazioni del livello delle falde, etc.;
- l'innescarsi di fenomeni di invecchiamento e/o di affaticamento dei materiali che costituiscono gli strati della pavimentazione. Tali fenomeno producono processi di indebolimento della sovrastruttura

a cui corrispondono variazioni in negativo delle funzioni regolarità e portanza.

Da indagini sperimentali si è notato come le curve rappresentative di decadimento della funzionalità, cioè come questa varia nel tempo, aumentano notevolmente laddove sono presenti degli ammaloramenti; in particolare, l'ormaiamento contribuisce in modo prevalente sulla variabile regolarità. Una sovrastruttura non perfettamente regolare causa nei veicoli in transito delle sollecitazioni anomale. Come conseguenza di ciò, gli autoveicoli ed in particolare i mezzi pesanti generano sulla superficie della pavimentazione notevoli incrementi di carico dinamico, dal quale la stessa sovrastruttura trae l'energia necessaria per l'evoluzione del proprio degradare [11].

3.7.2.4. Discomfort di guida

A causa dell'irregolarità del piano viabile il veicolo transitante è soggetto alle sollecitazioni aggiuntive rispetto alla normale marcia. Le ormaie creano soprattutto un incremento delle vibrazioni all'interno del veicolo causando un senso di disagio ai passeggeri [11].

3.7.3. I fattori che generano il fenomeno di deformazione permanente

Come già detto in precedenza, il fenomeno dell'ormaiamento dipende da diversi fattori e, in funzione di essi, ha diversi modi di

manifestarsi; principalmente le cause del verificarsi del fenomeno possono essere due:

- la prima dovuta al cedimento degli strati sottostanti la pavimentazione per effetto di una scarsa portanza;
- la seconda per effetto del fluage degli strati bituminosi dovuto alle proprietà visco-plastiche del bitume.

Se ponessimo una lente di ingrandimento sul fenomeno dell'ormaiamento, ci accorgeremmo che questo può essere attribuito ad una serie di parametri, inquadrabili in due categorie: i fattori intrinseci alla sovrastruttura e quelli estrinseci.

Tra i fattori intrinseci distinguiamo:

- struttura del corpo della sovrastruttura, ovvero lo spessore dei vari strati;
- proprietà dei materiali costituenti la sovrastruttura, a sua volta distinte in:
 - qualità degli inerti (assortimento granulometrico, spigolosità degli inerti e natura litologica);
 - qualità del filler;
 - dosaggio e qualità del bitume;
 - grado di compattazione.

Per i fattori estrinseci distinguiamo:

- geometria del tracciato, distinta in:

- presenza di rampe e zone di rallentamento;
- numero e larghezza delle corsie (canalizzate del traffico);
- velocità media e portata oraria;
- corsie riservate ai mezzi pesanti;
- difficoltà dell'itinerario.
- qualità e distribuzione del traffico veicolare, di cui si possono considerare:
 - numero dei mezzi pesanti;
 - tipo di aggressività del mezzo pesante;
 - carico per asse;
 - velocità del veicolo.
- condizioni climatiche, rappresentate da:
 - variazione della temperatura stagionale ed escursioni termiche giornaliere;
- intensità e durata dell'irraggiamento [11].

In Tab. 3.1 è riportato un quadro sinottico con i principali fattori da cui dipende il fenomeno dell'ormaiamento.

Tab. 3.1 Principali fattori da cui dipende il fenomeno dell'ormaiamento nei conglomerati bituminosi [12].

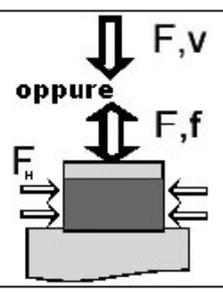
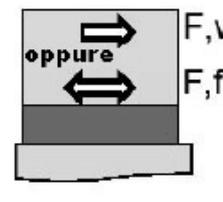
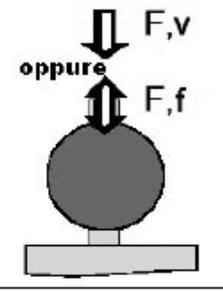
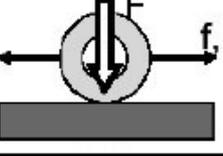
| | | <i>Fattore</i> | <i>Variazione del fattore</i> | <i>Effetti sulla resistenza all'ormaiamento</i> |
|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|---|
| FATTORI INTRINSECI | AGGREGATI | Tessitura della superficie | Da liscia a rugosa | Incremento |
| | | Distribuzione granulometrica | Da discontinua a continua | Incremento |
| | | Forma | Da arrotondata ad angolare | Incremento |
| | | Dimensione | Incremento dimensione max grani | Incremento |
| | LEGANTE | Durezza | Incremento | Incremento |
| | CONGLOMERATO BITUMINOSO | Dosaggio di legante | Incremento | Decremento |
| | | Contenuto di vuoti | Incremento | Decremento |
| | | Saturazione dei vuoti in bitume | Incremento | Decremento |
| | CONDIZIONI ESTRINSECHE | Temperatura | Incremento | Decremento |
| | | Carico: Intensità | Incremento pressione di contatto | Decremento |
| Carico: ripetizione | | Incremento | Decremento | |
| Acqua | | Da asciutto a bagnato | Decremento per miscele sensibili all'acqua | |

3.7.4. Lo studio del fenomeno della deformazione permanente in laboratorio

Per la verifica del comportamento di una pavimentazione bituminosa nei riguardi del fenomeno della produzione delle ormaie possono essere condotti appropriati studi sperimentali. Per fare ciò è necessario determinare l'entità della deformazione permanente che il conglomerato bituminoso dei vari strati subisce quando è sottoposto a ripetute applicazioni di uno stato tensionale del tipo di quello provocato dai carichi trasmessi dalle ruote dei veicoli [14].

Un possibile raggruppamento dei test di laboratorio oggi maggiormente in uso per lo studio dell'accumulo di deformazioni permanenti nei conglomerati bituminosi è riportato in Tab. 3.2, dove si distinguono:

- prove di compressione o creep (statiche o cicliche). Tali prove possono essere condotte con due distinte configurazioni di sollecitazione tensionale, monoassiale o triassiale. In questo ultimo caso il provino è soggetto ad un'azione di confinamento laterale con conseguente possibilità di testare il materiale a tensioni verticali prossime a quelle riscontrabili in sito.
- prove di taglio (statiche o cicliche);
- prove di trazione indiretta (statiche o cicliche);
- prove con simulatori di traffico (cicliche) [12].

| TIPOLOGIA DI PROVA | Schematizzazione sistema | Carico | Forma provino | Output Caratteristici |
|---|---|-------------------------|-------------------------------|---|
| Compressione (Creep) (Stato di sollecitazione imposta monoassiale o triassiale) |  | Statico o Ciclico | Cilindrico o Prismatico | Configurazione STATICO: - Modulo di Creep - Tempo; - Deformazione - Tempo Configurazione CICLICO: - Deformazione permanente - cicli di carico; - Modulo resiliente; - Modulo "dinamico"; - Coeff. Poisson; - Coeff. di smorzamento; |
| Taglio |  | Statico o Ciclico | Cilindrico | Configurazione STATICO: - Modulo a Taglio - Tempo; - Deformazione a Taglio - Tempo; Configurazione CICLICO: - Deformazione permanente di taglio - Cicli di carico - Modulo resiliente a taglio; - Modulo "dinamico" a taglio; - Coeff. di smorzamento. |
| Diametrale (trazione indiretta) |  | Statico o Ciclico | Cilindrico | Configurazione STATICO: - Modulo di Creep - Tempo; - Deformazione permanente - Tempo Configurazione CICLICO: - Deformazione permanente - cicli di carico; - Modulo resiliente; - Modulo "dinamico"; - Coeff. di smorzamento. |
| Simulatori di traffico |  | Ciclico | Cilindrico o prismatico | - Profili di ornamento ¹ - n° passaggi carico; - Deformazione Max - n° passaggi. <small>1 - Longitudinali e trasversali al verso di rotolamento</small> |
| <p>Note: F = Carico applicato - F_R = Azione di confinamento (per configurazione triassiale) - v = Velocità applicazione del carico F (configurazione statica) - f = Frequenza di applicazione del carico F (configurazione ciclica) - l = Lunghezza corsa ruota ornaiante.</p> | | | | |

Tab. 3.2 Principali test per lo studio dell'attitudine dei conglomerati bituminosi alle deformazioni permanenti [12].

I “simulatori di traffico” o macchine ormai capaci di riprodurre, a scala più o meno ridotta, ed in determinate condizioni di prova, l’azione deformante del carico veicolare (ruota viaggiante), ovvero consentono di riprodurre scenari tenso-deformativi del materiale affini a quelli di esercizio.

Tali prove permettono di determinare la deformazione subita dal provino nel tempo (rut depth) in funzione dei cicli di sollecitazione.

I principali simulatori di traffico oggi in uso in ambito internazionale sono:

- APA (Asphalt Pavement Analyzer);
- FRT (French Rutting Tester);
- HWTD (Hamburg Wheel Tracking Device);
- WTM (Wheel Tracker Machine) [14].

Quest’ultima è stata utilizzata nell’indagine sperimentale e di essa si parlerà nel capitolo applicativo.

References

- [1] E. Sterpi, *“Le Pavimentazioni, Costruzione di Infrastrutture per i trasporti I”*.
- [2] G. Dondi, V. Vignali. *“La sovrastruttura stradale per la mobilità non motorizzata”*, 2005.
- [3] Bianchi M., Prof. Dondi G., Tesi di laurea *“Criteri di calcolo delle pavimentazioni stradali flessibili: i metodi particellari”*, Università degli Studi di Bologna, 2009.
- [4] Di Figlia A., Prof. Di Mino G., Tesi di laurea *“Analisi comparativa di conglomerati bituminosi per strato di usura mediante la prova wheel tracker (UNI EN 12697-22)”*, Università degli Studi di Palermo, 2009.
- [5] Di Benedetto e Aa. Vv., 2003, *“Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution”*.
- [6] S. Carpenter. *“Fatigue Performance of Idot Mixtures”*. University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois Center for Transportation, 2006.

- [7] G. Di Mino, Dispense del corso di Management delle Infrastrutture Viarie, Università degli Studi di Palermo, A.A. 2010/11.
- [8] S. Shen, S. Carpenter. “*Dissipated Energy concepts for HMA performance: fatigue and healing*”, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois Center for Transportation, 2007.
- [9] SHRP, A-404. “*Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes*”, Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994.
- [10] Ing. Bragaglia M., Prof. Bucchi A., Prof. Simone A., Tesi di dottorato “*Studio del comportamento visco-elastico del conglomerato bituminoso con il metodo degli elementi distinti particellari*”, Università degli Studi di Bologna, 2007.
- [11] Di Francisca W., Prof. Boscaino G., Tesi di laurea “*La resistenza alle deformazioni permanenti nei conglomerati bituminosi. Indagine sperimentale con wheel tracker machine*”, Università degli Studi di Palermo, 2003.

- [12] Boscaino G., Vaiana R., XIII Convegno Nazionale S.I.I.V. “*Deformazioni permanenti di manti superficiali valutate tramite simulatore wheel tracker*”, Padova 30/31 Ottobre 2003.
- [13] Faure M., Simoncelli J. P., Bertaux J. M., “*L’ornierage des melanges bitumineux. L’influence du type de poids lourd*”, Reveus General des Routes et des Aerodromes n°697, Giugno 1992.
- [14] Grillini S., Volta E., “*La resistenza alle deformazioni permanenti dei conglomerati bituminosi. Alcune metodologie dei simulatori di traffico*”, Università degli Studi di Bologna, Rassegna del bitume 66/10.
- [15] P.S. Pell. “*Pavement Materials*”, Sixth International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 2 Proc., Ann Arbor, July 1987.
- [16] D. Sybilski, S. Styk, S. “*Stiffness modulus of bituminous mixtures: influence of temperature, mixture’s type and binder*”. *MTBM, Mechanical Tests for Bituminous Materials*, Lyon, Francia, 1997.

- [17] A. Montepara, A. Costa, “*Indagine sperimentale sul legame tra caratteristiche meccaniche dei conglomerati bituminosi ed energia di frattura*”. X Convegno S.I.I.V. – Catania 26/28 Ottobre 2000
- [18] F. Bonnaure, A. Gravois and J. Udron, “*A New Method for Predicting The Fatigue Life of Bituminous Mixes*”, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 49 Proc., Louisville, KY, Feb 1980.
- [19] Maupin, G. W. and J. R. Freeman, “*Simple Procedure for Fatigue Characterization of Bituminous Concrete*”, FHWA-RD-76-102, 1976.
- [20] .P.S. Pell and K. E. Cooper, “*The Fatigue of Testing and Mix Variables on The Fatigue Performance of Bituminous Materials*”, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 44 Proc., Phoenix, AZ, 1975.
- [21] T. Nishizawa, S. Shimeno and M. Sekiguchi, “*Fatigue Analysis of Asphalt Pavements with Thick Asphalt Mixture Layer*”, Eight International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 2 Proc., Seattle, WA, Aug 1997.

- [22] M.A. Miner, “Cumulative *Damage in Fatigue*”, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 67, 1945.
- [23] L. Franckenn and J. Verstraeten, “*Methods for Predicting Moduli and Fatigue Laws of Bituminous Road Mixes Under Repeated Bending*”, Transportation Research Record, No. 515, Washington, D.C., 1974.
- [24] J. Myre, “*Fatigue of Asphalt Materials for Norwegian Conditions*”, Seventh International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 3 Proc., U.K., 1992.
- [25] H. Di Benedetto, A.A. Soltani and P. Chaverot, “*Fatigue Damage for Bituminous Mixtures: A Pertinent Approach*”, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 65 Proc., Baltimore, MA, Mar 1996.
- [26] C. De La Roche and N. Riviere, “*Fatigue Behavior of Asphalt Mixes: Influence of Laboratory Test Procedures on Fatigue Performance*”, Eight International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 2 Proc., Seattle, WA, Aug, 1997.

- [27] H. Odeon and G. Caroff, “*Asphalt Mix Fatigue Behavior: Experimental Structures and Models*”, Eight International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 2 Proc., Seattle, WA, Aug 1997.
- [28] W. Van Dijk and W. Visser, “*The Energy Approach to Fatigue for Pavement Design. Proc.*”, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, pp. 1-40, 1977.
- [29] C.L. Monismith, J.A. Epps, D.A. Kasianchuk, and D.B. Mclean. “*Asphalt Mixture Behavior in Repeated Flexure*”, Report No. TE 70-5 , Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley, 1970.
- [30] El-Basyouny, and M. Witczak. “*Development of the Fatigue Cracking Models for the 2002 Design Guide*”, Presented at the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Jan 2005.
- [31] R.Y. Liang and J. Zhou. “*Prediction of Fatigue life of asphalt concrete beams*”, International Journal of Fracture. 1997.

- [32] D. Ramakant and D. Animesh. “*Fatigue propagation and performance of bituminous mixes as per Indian specifications*”, India.
- [33] U. Isacsson and X. Lu. “*Effect of binder rheology on the low-temperature cracking of asphalt mixtures*”, International Journal of Road Materials and Pavement Design (vol.2), Francia, 2001.
- [34] R.C.G. Haas and W.A. Phang. “*Relationships between mix characteristics and low-temperature pavement cracking*”, AAPT, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (vol. 57), USA, 1988.
- [35] C. Petit, I.L. Al-Quadi. and A. Millien. “*Cracking in Pavements: mitigation, risk assessment and prevention*”, Fifth International Rilem Conference. May 2004.
- [36] D.A. Anderson, Y.M. Le Hir, M.O. Marasteanu, J. Planche, D. Martin. “*Evaluation of fatigue criteria for asphalt binders*”, Transportation Research Record 1766, Transportation Research Board, Washington, pp. 48-56, 2001.

- [37] H. Baaj, B.S. Underwood, P. Chaverot. “*Fatigue of mixes: An intrinsic damage approach*”, RILEM Symposium PTEBM 03, Zurich, 2003.
- [38] M.A. Caltabiano and J.M. Brunton. “*Reflection cracking in asphalt overlays*”, Journal of Asphalt Paving Technology, Vol. 60, pp. 310-332.
- [39] S.H. Carpenter and M. Jansen. “Fatigue behavior under new aircraft loading conditions”. Proc., Aircraft Pavement Technology in the Midst of Change, ASCE, Reston, pp.259-271, 1997.
- [40] S.H. Carpenter, K.A. Ghuzlan, S. Shen. “A fatigue endurance limit for highway and airport pavement”, Journal of Transportation Research Record, N. 1832, pp.131-138, 2003.
- [41] J.S. Daniel and W.M. Bisirri. “*Fatigue evaluation of asphalt mixtures using dissipated energy and viscoelastic continuum damage approach*”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 73, pp. 557-583, 2004.

- [42] .S. Daniel and W.M. Bisirri. “*Characterizing fatigue in pavements materials using a dissipated energy parameter*”, Proceedings of the Geo-Frontiers 2005 Congress, Austin, Texas, 2005.
- [43] K. Ghuzlan and S.H. Carpenter. “*An energy-derived/damagebased failure criteria for fatigue testing*”, Transportation Research Record 1723, Transportation Research Board, Washington, 2000.
- [44] A.m: Hartman, M.D. Gilchrist, D. Nolan. “*Wheel-tracking fatigue simulation of bituminous mixtures*”, International Journal of Materials and Pavement Design, Vol. 2, pp. 141-160, 2001.
- [45] Y.R. Kim, D.N. Little, R.L. Lytton. “*Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures*”, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15 (1), pp. 75-83.
- [46] Y. Seo, Y.R. Kim, R.A. Schapery, M.W. Witzak, R. Bonaquist. “*A study of crack tip deformation and crack growth in asphalt concrete using fracture mechanics*”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 74, pp. 200-228, 2004.
- [47] S.C. Tangella, J. Craus, J.A. Deacon, C.L. Monismith. “*Summary report on fatigue response of asphalt mixture*”, Technical

memorandum N. TM-UCB-A-003A-89-3M, prepared for SHRP Project A-003A, SHRP-A/IR-90-011, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1990.

- [48] A. Archilla and S. Madanat. "Development of a Pavement Rutting Model from Experimental Data", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126(4), 291–299, 2000.
- [49] Süreyy Tayfura, Halit Ozen, Atakan Aksoy. "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, Issue 2, pp. 328–337, 2007.
- [50] G. Nievelt and H. Thamfald. "Evaluation of the resistance to deformation of different road structures and asphalt mixtures determined in the pavement-rutting tester", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, pp. 320-345, 1998.
- [51] R.C. Williams and B.D. Prowell. "Comparison of Laboratory Wheel-Tracking Test Results with Wes Track Performance", *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1681, pp. 121-128, 1999.

Bituminous Mixtures

4.1. Introduction

Flexible pavements are made of a mixture of mineral aggregates, mineral filler, voids and binder. Such mixture is used as the top portion of the flexible pavement structure to provide a resilient, waterproof, load-distributing medium that protects the subgrade from demaging effects of water and abrasive action of traffic.

Bituminous mixtures can contain additives of different kind in order to improve some of their mechanical characteristics.

Mineral aggregates may consist of crushed rock, crushed or uncrushed soils (including gravels and sands), slag, mineral filler, or a combination of some of these materials. Aggregates normally constitute 90 percent or more by weight of bituminous mixtures, and their properties greatly affect the finished product. The aggregate provides three basic functions when used in bituminous surfaces:

- It transmits the load from the surface down to the base course. In pavement, this is accomplished through the mechanical interlock of the aggregate particles.
- It withstands the traffic's abrasive action. If a wearing surface were laid consisting of binder alone, it soon would be worn away by the abrasive action of tires.

- It provides a nonskid surface. A portion of the aggregate extends slightly above the normal surface of the wearing mat, thereby providing a roughened surface for tires to grip.

A bituminous material is the adhesive agent or binder in a bituminous mixture. This material or binder provides two functions:

- It binds the aggregate together, holds it in place and prevents displacement.
- It provides a waterproof cover for the base and keeps surface water from seeping into and weakening the base material.

The binder's functions require it to be a waterproof substance having the ability to bind aggregate particles together. All bituminous materials possess these qualities due to being mainly composed of bitumen, a black solid that provides the black color, cementing ability, and waterproofing properties. Bituminous materials available in several forms suitable for different procedures of mixing or application under wide variations in temperature. Some bituminous materials are solid or semisolid at room temperature. Other grades are a relatively viscous (thick) liquid at room temperature. Mixing bituminous materials with solvents or water produces cutbacks or emulsions that are liquid at atmospheric temperatures. Such liquid asphalts and tars are used for cold mixes or are applied as sprays in building pavements.

4.2. Gli aggregati lapidei

Gli aggregati lapidei rappresentano la parte più consistente di tutta la miscela.

Gli aggregati sono componenti fondamentali del conglomerato bituminoso costituiti da elementi lapidei integri o frantumati, naturali o artificiali, aventi forma e dimensioni prestabilite.

Gli aggregati possono essere costituiti da elementi ottenuti dalla frantumazione di rocce di cava massive o di origine alluvionale, da elementi naturali a spigoli vivi o arrotondati [3]. Per esempio tra quelli naturali tondeggianti, cioè che presentano una superficie pressoché a spigoli arrotondati si hanno i ciottoli, le ghiaie, le sabbie.

Si possono poi avere aggregati di frantumazione che presentano almeno due spigoli vivi e si distinguono in naturali come la breccia, brecciolino e sabbia, oppure possono essere prodotti in impianto come pietrisco, pietrischetto, graniglia e sabbia. Per quanto riguarda la normativa si fa riferimento alla CNR 139/92 riguardante l'accettazione e il controllo degli aggregati, nella quale viene fornita una definizione degli aggregati in base alle loro dimensioni.

Dal punto di vista granulometrico possono distinguersi tre classi di aggregati lapidei, secondo le dimensioni dei grani:

- granulati o frantumati ($d > 2$ mm);
- sabbie ($d > 2$ mm);
- filler ($d < 0,075$) [2].

I diversi componenti e in particolare le sabbie, devono essere privi di materie organiche, solubili, alterabili e friabili. In particolare devono essere:

- non idrofili;
- resistenti all'abrasione e all'urto;
- spigolosi con buona tessitura e di forma adeguata: sono da preferire basalti, porfiriti, dioriti;
- puliti e non plastici [3].

Il filler è un additivo minerale derivato dalla frantumazione di rocce, preferibilmente calcaree.

Rispetto al materiale più grande, a parità di peso, presenta una maggiore superficie specifica e, quindi, un maggior legame con il bitume.

Il filler si distingue dagli altri aggregati in quanto svolge una duplice funzione:

- gli aggregati sono ricoperti da una pellicola di bitume il cui spessore è variabile fra i 10 e i 100 micron, quindi le particelle di filler più piccole di tale spessore saranno annegate in questa pellicola formando attorno ai granuli di dimensione superiore uno strato di mastice bituminoso (in questo caso il filler collabora con il bitume all'unione degli aggregati);
- la percentuale di filler con dimensioni maggiori della pellicola si comporterà come gli altri elementi lapidei contribuendo ad aumentare i punti di contatto tra essi [1].

In linea generale le caratteristiche di un aggregato possono essere raggruppate in tre categorie, ognuna delle quali deve rispondere ad alcuni requisiti normativi:

- caratteristiche geometriche, cosiddette caratteristiche governabili. Fanno parte di queste la dimensioni, la granulometria, la forma e la spigolosità;
- caratteristiche fisico-chimiche come la pulizia, la massa volumica reale e la massa volumica apparente, la porosità del filler compattato, la friabilità, la gelività, il contenuto di rocce degradabili e lo spogliamento in acqua;
- caratteristiche meccaniche, dette anche “non governabili”, tra cui la resistenza alla frantumazione, la resistenza alla frammentazione, la resistenza all’usura deval, la resistenza alla levigatura [2].

4.3. Il bitume

Con il termine bitume si intende il prodotto della distillazione sottovuoto del petrolio, costituito da una miscela complessa di idrocarburi ad elevato peso molecolare. La percentuale di componenti presenti varia in funzione della provenienza del petrolio grezzo e dei metodi di distillazione e lavorazione. I bitumi che derivano dal processo di raffinazione del greggio di petrolio sono detti industriali, ma esistono anche dei bitumi denominati naturali (originati da un processo di

trasformazione delle piante lungo milioni di anni). Questi ultimi si possono trovare in molti punti della superficie terrestre come componenti impregnanti formazioni rocciose, sabbie o carboni, sotto forma di affioramenti (vene, sacche), allo stato di soluzioni in molti petroli. Il bitume naturale (vedi Fig. 4.1) è un prodotto non più utilizzato nell'industria: i processi di raffinazione del petrolio producono attualmente bitumi di qualità soddisfacente. Il prodotto ottenuto dalla distillazione può essere sottoposto a processi chimici e fisici che ne variano la composizione al fine di conferirgli determinate proprietà.

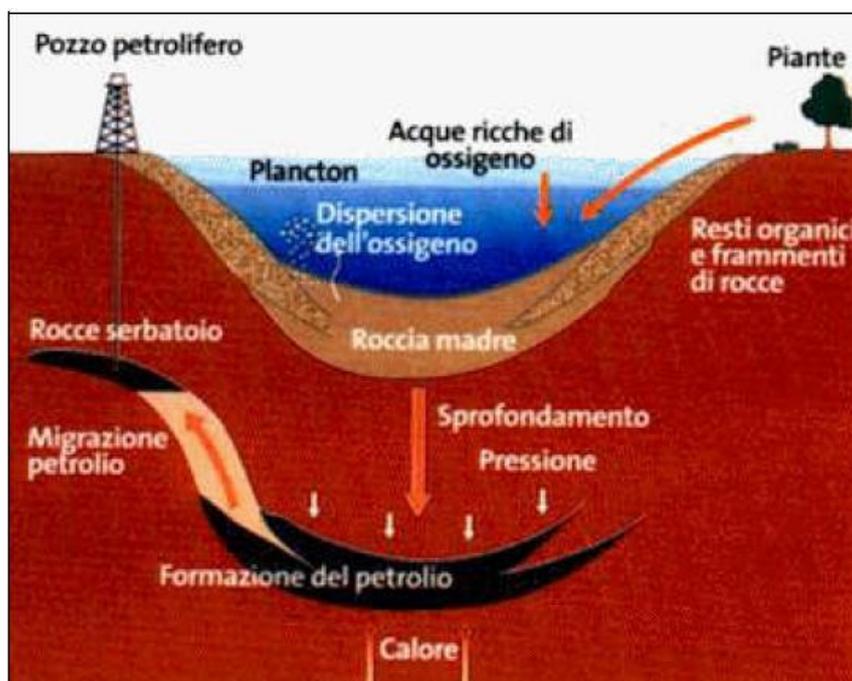


Fig. 4.1 - Formazione del bitume.

I costituenti essenziali del petrolio sono gli idrocarburi, composti binari principalmente formati da carbonio (80% in peso) e idrogeno (10%), ma anche zolfo (0÷10 %), ossigeno (0÷3 %), azoto (0÷3 %) e piccole quantità di composti che comprendono elementi diversi come nichel, vanadio, ferro e rame.

Una delle proprietà peculiari del bitume è quella di essere un materiale avente le caratteristiche di visco-elasticità [1].

Nei bitumi si distinguono quattro gruppi di componenti:

- carboidi;
- carbeni;
- asfalteni (danno la durezza ed il colore nero);
- malteni, che possono a loro volta essere suddivisi in:
 - resine;
 - petrogeni suddivisi in oli saturi e aromatici.

I bitumi possono essere definiti come “dispersione colloidali” di asfalteni (15%) nei malteni ovvero nelle masse di oli (aromatici: 55%, saturi: 10%) che mantengono stabile la dispersione colloidale, in presenza di resine (20%) che fungono da fattori di peptizzazione [4].

Nei processi industriali di raffinazione e lavorazione del petrolio greggio è riprodotta artificialmente la formazione dei bitumi naturali.

Il processo produttivo in raffineria consta di due fasi: la distillazione e la lavorazione. Il bitume è ottenuto come prodotto di fondo della torre di distillazione sottovuoto (Fig. 4.2), preposta alla lavorazione del residuo di una prima distillazione a pressione atmosferica. La

distillazione è un processo fisico durante il quale vengono separate le fasi di una miscela per effetto delle diverse temperature di ebollizione e di condensazione che competono a ciascuna di esse. Le frazioni che si ottengono per distillazione di un greggio di petrolio sono: gas, benzine leggere e pesanti, gasolio leggero e pesante, oli combustibili e bitumi.

I greggi particolarmente adatti all'ottenimento dei bitumi stradali sono quelli aromatici-asfaltici (greggi venezuelani e messicani). Le operazioni di distillazione avvengono in speciali impianti, le torri di distillazione, poste in genere sottovuoto per raggiungere i diversi punti di ebollizione a temperature più basse.

In ordine di densità crescente si ottengono:

- un distillato di testa;
- benzine leggere e pesanti;
- kerosene;
- gasolio leggero e pesante;
- un residuo detto “residuo atmosferico”.

Quest'ultimo viene distillato in unità sottovuoto a pressione ridotta per evitare il cracking del materiale, dalla sua distillazione si ricavano: oli lubrificanti leggeri e pesanti non raffinati e un residuo denominato “residuo vuoto”.

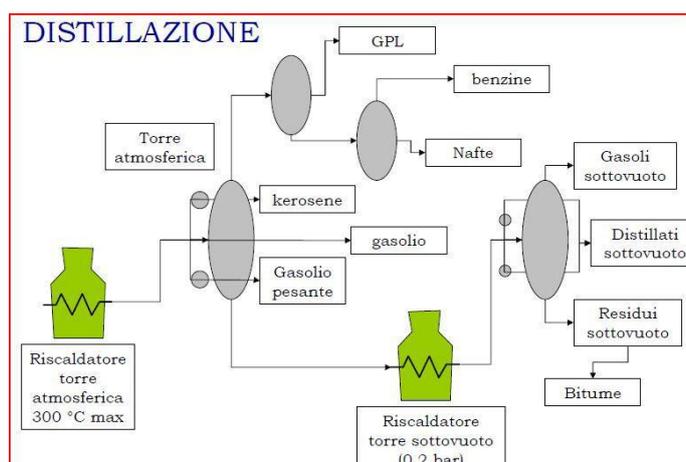


Fig. 4.2 - Il processo produttivo in raffineria: la fase di distillazione [4].

La formazione dei bitumi naturali avviene in seguito all'affioramento del petrolio, contenuto nelle rocce, in superficie. A contatto con l'aria gli idrocarburi più leggeri evaporano, mentre quelli più pesanti si ossidano e polimerizzano. Con il tempo, il petrolio esposto all'aria finisce per trasformarsi in un deposito, in genere solido, semisolido o molle, di bitume. Nel suo percorso, il petrolio trascina particelle di limo, sabbia, argilla, cosicché i bitumi naturali contengono sempre materia insolubile in solfuro di carbonio.

Le caratteristiche fondamentali di un buon legante sono:

- sufficiente rigidità alle alte temperature di esercizio, accompagnata da una non eccessiva fragilità nel periodo invernale, o nei climi particolarmente freddi. La suscettività termica è uno dei maggiori pregi, ma anche uno dei maggiori problemi del bitume;

- buona adesività al materiale inerte: è forse il fattore principale per contrastare il deterioramento: favorisce la resistenza meccanica alle sollecitazioni, in quanto le caratteristiche visco-elastiche del bitume si trasmettono al conglomerato, e rende la pavimentazione impermeabile, impedendo all'umidità di penetrare. L'acqua, se presente nel conglomerato, entra in competizione con il bitume nel legarsi all'aggregato lapideo e causa ulteriore perdita di adesione;
- facilità di miscelamento al materiale inerte: il legante non deve presentare eccessiva viscosità alle alte temperatura altrimenti ci sarà una miscelazione incompleta e una difficoltà di messa in opera [1].

4.3.1. Prove sui bitumi

Per determinare le principali caratteristiche si effettuano prove su campioni di bitume secondo le procedure riportate nella normativa di riferimento:

- prova di penetrazione (Norma C.N.R. - B.U. n° 24/71, Norma UNI EN 1426:2007);
- metodo palla-anello per il punto di rammollimento alle alte temperature (Norma C.N.R. - B.U. n° 35/73, Norma UNI EN 1427:2007);
- metodo Fraass per il punto di rottura alle basse temperature (Norma C.N.R. - B.U. n° 43/74, Norma UNI EN 12593:2007);

- prova di duttilità (Norma C.N.R. - B.U. n° 44/74, Norma UNI EN 13398, Norma ASTM D113, Norma AASHTO T51);
- prova di perdita per riscaldamento (volatilità) in strato sottile (Norma C.N.R. - B.U. n° 54/77) ovvero Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) (Norma UNI EN 12607-1:2007, Norma ASTM D2872, Norma AASHTO T240);
- determinazione dei parametri visco-elastici (G^* , δ , etc.) tramite apparato D.S.R (Dynamic Shear Rheometer) (Norma UNI EN 14770:2006, Norma AASHTO TP5, Norma ASTM purposal 248, Norma SHRP Test Method B-003);
- invecchiamento del legante ad alta temperatura e pressione tramite apparato P.A.V (Pressure Aging Vessel) (Norma UNI EN 14769:2006, Norma AASHTO PP1 –AASHTO T240, Norma ASTM 2872);
- deformabilità alle basse temperature tramite apparato B.B.R. (Bending Beam Rheometer) (Norma UNI EN 14771:2005, Norma AASHTO TP1, Norma SHRP Test Method B-002) [5];
- prova di viscosità dinamica con il viscosimetro rotazionale Brookfield (Norma UNI EN 13302:2010, Norma ASTM D2196);
- punto di infiammabilità (flash point) tramite apparecchio Cleveland a vaso aperto (Norma UNI EN ISO 2592:2010, Norma C.N.R. - B.U. n° 72/79, Norma ASTM D92).

4.3.2. Classificazione dei bitumi

È possibile classificare i bitumi in base al valore di affondamento ottenuto con la prova di penetrazione, ottenendo le seguenti classi di penetrazione:

Tab. 4.1 - Classi di penetrazione del bitume [4].

| PENETRAZIONE (dmm) |
|-----------------------|
| 20/30 |
| 30/45 |
| 35/50 |
| 50/70 |
| 70/100 |
| 100/150 |
| 160/220 |
| 250/330 |

Una nuova metodologia di classificazione è il grado di prestazione o performance grade PG x-y, dove:

- x è la media delle temperature massime nei sette giorni consecutivi più caldi dell'ultimo ventennio;
- y è la media delle temperature minime nei giorni più freddi dell'anno.

Un'ulteriore classificazione riguarda la tipologia dei bitumi. Grandi passi in avanti in questi decenni si sono fatti anche nel campo dei leganti, in particolare di quelli organici. A fianco dei bitumi tradizionali troviamo oggi le emulsioni bituminose, dispersioni di bitume (fase dispersa, 50÷70 % in peso) in acqua (fase disperdente, 30÷40 %) rese stabili per un

determinato periodo dall'aggiunta di emulsionanti (1÷3 %), che sono impiegate oggi per le mani d'attacco o di ancoraggio degli strati di conglomerato bituminoso a caldo e nella produzione di conglomerati a freddo. Altra innovazione nel campo dei leganti idrocarburici è stata l'introduzione dei bitumi modificati, ossia bitumi tradizionali cui vengono aggiunti in appositi impianti polimeri [6]. Questi modificanti conferiscono caratteristiche migliori al conglomerato:

- maggior resistenza alle deformazioni permanenti;
- maggior resistenza alla propagazione di fessure.

I polimeri sono composti chimici complessi derivanti dall'unione di più molecole semplici, dette monomeri.

I polimeri possono essere naturali (es. gomma naturale) o provenire da processi di sintesi, principalmente dalla petrolchimica. Possono essere classificati in due grandi categorie:

- termoplastici suddivisi a loro volta in elastomeri e plastomeri;
- termoindurenti.

Rispetto al bitume tradizionale, quello modificato con polimeri consente un maggior intervallo di elastoplasticità, un migliore comportamento sia alle alte che alle basse temperature e una maggiore viscosità associata ad una maggiore resistenza al carico, alla fatica e all'invecchiamento.

La grande maggioranza dei modificanti (circa il 75%) è costituita dagli elastomeri termoplastici, i più diffusi sono SBS (Stirene-Butadiene-Stirene), SIS (Stirene-Isopropene-Stirene) e SB (Stirene-Butadiene) [1].

Ulteriore novità è il bitume schiumato (o espanso), prodotto in una camera di espansione dove al bitume scaldato fino a $160\div 180^{\circ}\text{C}$ vengono aggiunte acqua ($2\div 5\%$ in peso rispetto al legante) e aria compressa (vedi Fig. 4.3): a causa dell'elevata temperatura, l'acqua vaporizza e si espande all'interno del bitume che diventa schiumoso, aumentando di volume di 15-20 volte, e rimane tale per alcuni secondi, durante i quali deve essere miscelato agli inerti.

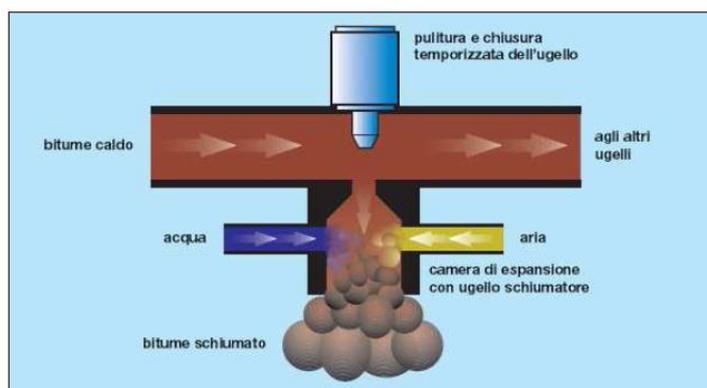


Fig. 4.3 Sistema di espansione del bitume.

La schiuma incrementa la superficie specifica del bitume e riduce considerevolmente la sua viscosità, rendendo il legante più adatto alla miscelazione con gli aggregati freddi e umidi [3]. Il bitume schiumato viene impiegato sia nel riciclaggio a freddo dei conglomerati bituminosi, sia nella stabilizzazione delle terre.

La necessità di ridurre i consumi energetici e l'inquinamento, nonché la tutela della salute dei lavoratori, sta sollecitando lo sviluppo di

leganti idrocarburici che, rispetto ai tradizionali, possano essere impiegati a temperature inferiori. Ecco allora affacciarsi sul mercato bitumi additivati con paraffine sintetiche che ne abbassano la viscosità a partire da 120°C favorendone la lavorazione già a queste temperature, senza però intaccarne le caratteristiche meccaniche in condizioni di esercizio; in alternativa è previsto l'impiego di bitumi additivati con zeoliti, cristalli in grado di liberare vapore se surriscaldati e che provocano un'espansione del legante come nel caso del bitume schiumato [6].

Infine si possono avere anche bitumi flussati, cioè bitumi resi sufficientemente fluidi al fine di essere messi in opera senza riscaldamento o con moderato riscaldamento, grazie all'aggiunta effettuata in raffineria di solventi volatili di distillazione a lenta evaporazione (benzine, oli di distillazione del catrame, aromatici in genere) e bitumi soffiati, cioè sottoposti in raffineria ad aerazione per insufflazione d'aria per alcune ore mentre si trovano allo stato liquido. Parte dei componenti viene in tal modo ossidata ottenendo, in questo modo, un bitume più viscoso, più resistente al rammollimento e che col tempo modificherà la sua viscosità in misura inferiore, in quanto meno sensibile all'ossigeno atmosferico e quindi all'invecchiamento. L'insufflaggio di aria arricchisce il bitume di asfalteni che costituiscono la frazione più pesante delle parti di cui è composto il legante [2].

4.3.3. Gli additivi

Gli additivi sono prodotti naturali o artificiali che, aggiunti alla miscela, migliorano le prestazioni del conglomerato. Gli attivanti di adesione, ad esempio, sono sostanze tensioattive che favoriscono l'adesione bitume-aggregato, utilizzate per migliorare la durabilità all'acqua delle miscele bituminose [3].

La durata di un conglomerato è infatti legata alla buona adesione tra bitume ed inerte ed alla possibilità che questa venga conservata nel tempo. La perdita di adesione comporta un rapido deterioramento degli strati superficiali della pavimentazione stradale costituiti da conglomerato bituminoso (spogliamento degli aggregati) e soggetti all'azione del traffico, adesione che viene meno soprattutto in presenza di acqua meteorica o di falda. Questo induce ad auspicare un valore di adesione che in condizioni di asciutto non abbia una drastica caduta in presenza d'acqua, ragion per cui la prova di adesione viene condotta anche su provini bagnati. L'uso di attivanti risulta sempre utile, soprattutto ogni qualvolta si abbia un'adesione di tipo apparente tra il bitume e il materiale lapideo, questo è in relazione al tipo di inerte utilizzato (quarzo, filladi, scisti, rocce con silice libera, etc.), alla sua umidità (aggregati umidi non riscaldati) o a quella dell'ambiente, al fine di riuscire a ridurre le problematiche di un possibile sgranamento dell'intero manto stradale. Gli attivanti permettono inoltre di contrarre l'ossidazione del bitume alla quale sono connessi i fenomeni di fragilità e rapido invecchiamento delle pavimentazioni, favorendo, in definitiva,

una maggiore durata del conglomerato posto in opera. Il fenomeno dell'adesione risulta regolato da diversi meccanismi che coinvolgono, tra gli altri, i seguenti fattori: le reazioni chimiche di neutralizzazione tra i composti acidi del bitume e quelli basici eventualmente presenti sulla superficie degli inerti; la formazione di tensioni interfacciali tra il legante bituminoso e la superficie lapidea (es. pressione di vapore nella miscelazione); gli effetti meccanici legati al grado di ruvidità e porosità posseduta dalla superficie degli inerti.

Tra gli additivi maggiormente utilizzati per la realizzazione di conglomerati bituminosi vi sono:

- attivanti chimico funzionali (ACF), impiegati per il recupero del fresato, al fine di riconferire al legante le caratteristiche chimiche e fisiche perse. Vengono miscelati con il nuovo bitume, che deve essere aggiunto a quello da rigenerare, direttamente nel serbatoio di stoccaggio, immettendo la quantità precalcolata al momento del carico. La quantità aggiunta è funzione della massa di fresato utilizzato, lo 0,2% ÷ 0,3% sul peso del bitume nuovo introdotto ogni 5% di fresato immesso nel conglomerato (4% ÷ 6% per 100% di RAP).
- fibre vetrose, di cellulosa, metalliche, polimeriche, che danno vita al conglomerato bituminoso fibrorinforzato (FRBC), che rappresenta una delle maggiore innovazioni in questo settore [2].

Il loro dosaggio deve essere indicato da progetto e varia a seconda delle condizioni di impiego, degli aggregati e delle caratteristiche del prodotto [3].

4.4. Il conglomerato bituminoso tradizionale

Il comportamento meccanico delle miscele bituminose dipende dalle proprietà dell'aggregato, dal tenore di legante e dalle tecniche di modifica adottate per il confezionamento ed in particolare le reazioni alle sollecitazioni sono influenzate dall'interazione fisico-chimica tra le fasi costituenti.

La resistenza a compressione del conglomerato è garantita dal trasferimento degli sforzi, attraverso i relativi punti di contatto, ai diversi grani dello scheletro litoide. La resistenza a trazione e taglio della miscela è ottenuta dall'azione legante del bitume.

Quindi il comportamento meccanico della miscela dipende dalla coesione garantita dall'azione legante del bitume e dall'attrito interno determinato dalla spigolosità e dal grado di compattezza dei grani lapidei.

I conglomerati bituminosi possono essere distinti in due categorie:

- conglomerati bituminosi a caldo, noti come Hot Mix Asphalt, in questi tipi di conglomerati la miscelazione avviene a temperature molto elevate;

- conglomerati bituminosi a freddo, noti come Cold Mix Asphalt, in questi tipi di conglomerati la miscelazione avviene appunto a basse temperature. E' un conglomerato che per caratteristiche tecniche viene impiegato per strade secondarie o comunque per strade con scarso traffico.

Nel caso in cui il conglomerato sia realizzato con bitume modificato devono essere previste delle temperature di confezionamento maggiori. Un'altra classificazione che si può eseguire sui conglomerati bituminosi è in relazione alla composizione di vuoti che si possono avere, ed esattamente si hanno:

- chiusi, con una percentuale di vuoti minore del 6%;
- semichiusi, con una percentuale di vuoti compresa tra il 6 ed il 12%;
- semiaperti, con una percentuale di vuoti compresa tra il 12 ed il 18%;
- aperti, con una percentuale di vuoti maggiore del 18% (in particolare le pavimentazioni drenanti fonoassorbenti raggiungono valori di vuoti compresi tra il 22 ed il 24%) [2].

Le fasi relative alla realizzazione di una miscela stradale, come lo è il conglomerato bituminoso, possono essere così sintetizzate:

- progetto della miscela o mix design;
- confezionamento;
- trasporto;

- posa in opera;
- controlli [7].

4.4.1. Cenni sul mix-design dei conglomerati bituminosi e aspetti tecnologici di produzione e posa in opera

La composizione della miscela di inerti e bitume più idonea alle condizioni di esercizio cui sarà sottoposta la pavimentazione, si determina attraverso il processo del mix-design volumetrico, con il quale si stabiliscono le caratteristiche finali della miscela [2].

Il mix design è stato oggetto di molte attenzioni per il ruolo che esso riveste nelle problematiche relative alla capacità strutturale, alla difficoltà di reperire materiali tradizionali e all'onerosità degli interventi manutentivi. Fino ad oggi, il metodo più diffuso è stato il metodo Marshall che, in base a procedure standardizzate di confezionamento dei provini e di determinazione di parametri fisico-meccanici (stabilità e rigidità Marshall, percentuale dei vuoti), fornisce il contenuto ottimo di legante da utilizzare nel confezionamento della miscela. Tale procedura mostra però dei limiti; correlati soprattutto alla sua natura convenzionale:

- sviluppata per conglomerati tradizionali chiusi e di spessore limitato, essa risulta inadeguata per strati di elevato spessore;
- le modalità di costipamento tendono a simulare la compattazione del materiale dopo un numero limitato di passaggi di assi equivalenti, non corrispondente agli attuali carichi di traffico;

- il metodo di determinazione delle grandezze comporta il raggiungimento di uno stato plastico, che generalmente non si raggiunge durante l'esercizio della pavimentazione;
- non permette di fare una previsione delle prestazioni della pavimentazione.

Proprio l'interesse nei confronti delle performance ha indirizzato i metodi di mix design verso indicazioni di tipo prestazionale e non più verso vincoli di composizione ed esecuzione. In questa direzione si è mosso il Progetto SHRP (Strategic Highway Research Program), avviato negli anni '80, il cui prodotto finale è il Superpave (SUPERior PERforming asphalt PAVements) system, un insieme di specifiche sui materiali, nuove tecniche e dispositivi di prova, metodo di mix design e software di elaborazione dei dati.

Si articola su tre livelli di complessità sempre crescente in funzione dell'entità e della composizione del traffico previsto. Il primo livello si basa sull'utilizzo di un metodo volumetrico per la formulazione delle miscele; il secondo e terzo livello, oltre a criteri volumetrici di mix design, si avvalgono di nuove strumentazioni di prova tendenti a prevedere le prestazioni della pavimentazione.

Il metodo volumetrico si articola in tre fasi:

- selezione degli aggregati tramite la determinazione della curva granulometrica e delle caratteristiche fisiche degli inerti. Si è visto infatti che spigolosità, coefficiente di forma, contenuto di argilla,

assortimento granulometrico e durezza influiscono sulle prestazioni finali della pavimentazione;

- selezione del tipo di legante. La classificazione del legante si basa sulle temperature estreme previste nella pavimentazione. La scelta del tipo di bitume da utilizzare prende in considerazione non solo le condizioni ambientali, ma anche i volumi di traffico e la velocità dei veicoli;
- determinazione del contenuto ottimo di bitume tramite la definizione della massa volumica apparente e di altre caratteristiche volumetriche dei provini compattati mediante pressa di taglio giratoria.

Alla base dello sviluppo di tale metodo sta la constatazione che una miscela che soddisfa determinate caratteristiche volumetriche rispetta generalmente i requisiti di stabilità e rigidità Marshall ed ha elevate probabilità di manifestare un buon comportamento in opera nei confronti di ormaiamento e fessurazioni causate da fatica e basse temperature.

Si può risalire infatti alle prestazioni nei riguardi di questi difetti superficiali correlando le caratteristiche volumetriche della miscela al termine della vita utile a quelle ottenute in laboratorio fissando in modo opportuno il numero di giri della pressa di taglio giratoria [6].

Lo scopo di questa apparecchiatura è quello di realizzare campioni di conglomerato, da sottoporre a diversi tipi di prove, aventi caratteristiche simili a quelle prodotte dai rulli, in fase di realizzazione

della stesa, e dal traffico in esercizio, avendo la possibilità di variare i seguenti parametri:

- angolo di inclinazione (valore tipico 1.25°);
- pressione di costipamento (valore tipico 600 KPa);
- velocità di rotazione (valore tipico 30 giri/minuto);
- numero di giri (in genere tra 5 e 200) [8].

Il confezionamento dei conglomerati bituminosi ovvero la miscelazione di inerti, bitume ed eventuali additivi avviene in sito oppure in impianto continuo (dosaggio a volume) o discontinuo (dosaggio a peso) e può avvenire, come già detto, a caldo o a freddo. Con il confezionamento a caldo si raggiungono temperature non inferiori a $150\div 180^\circ\text{C}$, necessarie per la completa essiccazione degli aggregati al fine di evitare che l'umidità residua possa determinare, nel medio-lungo termine, la perdita di adesione tra bitume ed aggregati.

Inoltre le elevate temperature, abbassando la viscosità del bitume, rendono possibile il completo rivestimento degli inerti e conferiscono alla miscela l'adeguato grado di lavorabilità necessario per le successive operazioni di stesa e compattazione.

Le tecnologie di confezionamento a freddo si caratterizzano invece per i ridotti consumi energetici ed i bassissimi livelli di emissioni e si basano sull'impiego di emulsioni bituminose in grado di veicolare, a temperatura ambiente, il bitume tra gli aggregati.

Un aspetto critico di questa tecnica è che il rivestimento degli inerti inizia solo dopo la "rottura" dell'emulsione e pertanto il raggiungimento

delle adeguate caratteristiche meccaniche necessita di un periodo di maturazione della miscela che può durare anche dei mesi [9].

Il trasporto può avvenire su strada o su ferrovia e assume un ruolo fondamentale se la miscelazione avviene in impianto.

Prima della stesa di uno strato di conglomerato bituminoso è necessario preparare la superficie per garantire una adeguata adesione all'interfaccia mediante l'applicazione di emulsioni bituminose aventi caratteristiche specifiche. A seconda che lo strato di supporto sia in misto granulare oppure in c.b. si parlerà di mano di ancoraggio e mano d'attacco. Con la prima si intende una emulsione bituminosa a rottura lenta e bassa viscosità, applicata sopra uno strato in misto granulare prima della realizzazione di uno strato in conglomerato bituminoso.

Scopo di tale lavorazione è quello di riempire i vuoti dello strato non legato irrigidendone la parte superficiale fornendo al contempo una migliore adesione per l'ancoraggio del successivo strato in conglomerato bituminoso.

Per mano d'attacco si intende una emulsione bituminosa a rottura media oppure rapida (in funzione delle condizioni di utilizzo), applicata sopra una superficie di c.b. prima della realizzazione di un nuovo strato, avente lo scopo di evitare possibili scorrimenti relativi aumentando l'adesione all'interfaccia

La posa in opera comprende due fasi: la stesa ed il costipamento (vedi Fig. 4.4). Essa dipende dalla miscelazione: se questa avviene in sito, si effettua lo spandimento della miscela bituminosa con la

livellatrice ed il costipamento con rulli (gommati, vibranti o statici), mentre nel caso di miscelazione in impianto si usa una macchina vibrofinitrice dotata di due parti, motrice ed operatrice.



Fig. 4.4 A sinistra: Fase di stesa; a destra: fase di compattazione [2].

Le fasi di produzione e di stesa (la temperatura del conglomerato bituminoso all'atto della stesa deve risultare in ogni momento non inferiore a 130°C) dei conglomerati bituminosi sono caratterizzate da temperature differenti (vedi Fig. 4.5).

I controlli devono essere effettuati:

- prima (prove di stabilità e determinazione percentuale dei vuoti);
- durante (rispetto delle temperature di miscelazione e costipamento);
- dopo la posa in opera (tramite prelievo di provini con carotatrice su cui si determina la percentuale dei vuoti e la percentuale di bitume, misure dello spessore, dell'efficienza del costipamento, dell'efficienza dello strato e della regolarità superficiale).

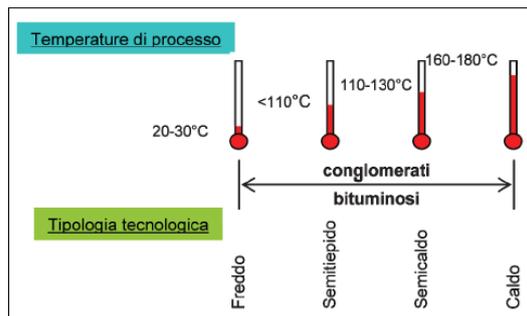


Fig. 4.5 Temperature di produzione e di stesa dei conglomerati bituminosi [3].

4.5. I conglomerati bituminosi innovativi

Negli anni le caratteristiche peculiari delle sovrastrutture flessibili sono rimaste invariate; ciò non ha impedito però alla ricerca di progredire e introdurre elementi di novità. Oggi la crescente domanda di prestazioni e le esigenze di salvaguardia dell'ecosistema spingono a sviluppare nuove tecnologie di lavorazione e monitoraggio, a sperimentare l'impiego di nuovi materiali, a migliorare i modelli di analisi e i metodi

di progetto delle pavimentazioni e delle miscele di materiali. Il criterio seguito è quello di un impiego più razionale delle risorse e dell'uso di tecniche a basso impatto ambientale.

Da un lato l'esaurimento di cave esistenti, dall'altro la mutata sensibilità verso le problematiche ambientali ha reso sempre più difficoltoso il prelievo di materiale inerte di qualità.

Queste circostanze, unitamente alla volontà di limitare il conferimento in discarica di materiali di scarto, ha fatto sì che l'impiego di materiali riciclati nella costruzione delle pavimentazioni si stia affermando: si può far uso nella fondazione di materiali derivati da rifiuti provenienti da attività di costruzione e demolizione (C&D), nei conglomerati bituminosi di ceneri volanti per la frazione di filler, di granulato di gomma e di frammenti di vetro a sostituzione di parte dell'aggregato (rubberized asphalt e glasphalt), come anche l'utilizzo di altri rifiuti opportunamente trattati (sabbie di fonderia, materiali di lavorazione, scorie di acciaieria, polverino di gomma di pneumatici dismessi, etc.). Ulteriori esempi di risparmio di risorse naturali non rinnovabili, nonché di risorse economiche, sono la stabilizzazione a calce, a cemento o mediante loppe d'altoforno di terreni di fondazione e di sottofondo e il riciclaggio (a caldo o a freddo) di strati in conglomerato bituminoso negli interventi manutentivi.

Monitoraggi, e in alcuni casi sperimentazioni, su tali materiali sono ancora in atto per verificare che, oltre agli innegabili benefici economici e ambientali, il loro impiego non comporti limitazioni significative alle

caratteristiche fisico-meccaniche dei prodotti finali [6]. Il recupero ed il riciclaggio delle sovrastrutture esistenti e l'utilizzo di nuovi materiali abbinati a nuove tecnologie di produzione ha dato vita alle cosiddette pavimentazioni speciali [3]. Si tratta di conglomerati aventi particolari caratteristiche granulometriche ed elevata qualità dei materiali costituenti.

Rientrano in questa categoria i conglomerati ad alto modulo complesso, gli splitt mastix asphalt, i microtappeti, i conglomerati drenanti fonoassorbenti mono e doppio strato, i conglomerati con granulato di gomma, etc. [6].

I conglomerati bituminosi drenanti e fonoassorbenti contribuiscono all'aumento di aderenza in caso di pioggia, all'eliminazione del fenomeno di aquaplaning, all'abbattimento del rumore, come anche gli splitt mastix asphalt (o conglomerati di usura antisdrucchiolo) che in più aumentano la portanza della pavimentazione, riducono l'occlusione dei pori ed evitano la formazione del ghiaccio.

Nel merito delle pavimentazioni che contribuiscono alla diminuzione dell'inquinamento i conglomerati a bassa energia, non ancora applicati in larga scala ma oggetto di notevoli sperimentazioni, grazie alla diminuzione di temperatura di produzione e di stesa contribuiscono al risparmio energetico ed alla riduzione degli inquinanti emessi in atmosfera migliorando notevolmente anche le condizioni di lavoro; infatti tale riduzione influisce non solo sulla quantità dei fumi emessi, ma anche sulla loro composizione e comporta anche una minore

usura dei mezzi utilizzati nell'ambito del processo di produzione. Tali conglomerati prendono il nome di WMA (Warm Mix Asphalt, traducibile in Miscela Bituminosa Tiepida), in quanto ottenuti da processi in cui le temperature risultano di decine di gradi inferiori a quelle tipiche delle tecniche di produzione a caldo (HMA Hot Mix Asphalt).

Le applicazioni sono molteplici e di varia natura, basate principalmente o sull'additivazione del bitume con fluidificanti o sulla schiumatura del bitume [9].

Importante è la tematica del riciclaggio verso la quale ci si è indirizzati negli ultimi anni realizzando l'utilizzo del fresato e le pavimentazioni con polverino di gomma derivante da pneumatici dismessi. L'utilizzo del fresato permette di effettuare manutenzione stradale riducendone i costi. E' importante, infatti, puntualizzare che la maggior parte delle strade italiane necessita di manutenzione. Questa tecnologia rappresenta la soluzione non solo in termini di risparmio energetico ma anche di risparmio economico.

Altro materiale di riciclo sono gli pneumatici dismessi, il cui uso rappresenta una soluzione ai problemi legati alla gestione delle discariche di pneumatici a causa dell'elevato volume di applicazione, del rischio di incendio e di instabilità del corpo della discarica, dell'inquinamento dovuto alla loro degradazione. Gli pneumatici dimessi appartengono alla categoria dei "rifiuti speciali" non pericolosi. La triturazione e la miscelazione con il bitume crea quello che comunemente viene chiamato asphalt rubber. Il suo impiego nella realizzazione dei conglomerati

bituminosi si è tradotto in un aumento della vita utile della pavimentazione e resistenza maggiore alle basse temperature, aumento dell'aderenza, riduzione del fenomeno dell'aquaplaning, del rumore di rotolamento e della risalita delle fessurazioni [3].

4.5.1. I conglomerati bituminosi con RAP

Il RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) o fresato è, per definizione, il materiale che si ottiene dalla frantumazione a blocchi oppure dalla fresatura a freddo o a caldo degli strati di conglomerato bituminoso, costituenti le pavimentazioni stradali, tramite idonee macchine fresatrici. È un aggregato con una sua curva granulometrica che contiene bitume invecchiato. Prima del suo riutilizzo deve essere vagliato per eliminare eventuali elementi (grumi, placche, etc.) di dimensioni superiori al diametro massimo previsto per la miscela. Secondo le prescrizioni di Capitolato, qualora la composizione granulometrica del materiale fresato non consenta la realizzazione della curva di progetto e/o il bitume nel conglomerato da riciclare sia maggiore del 5%, la miscela deve essere integrata con inerti nuovi [9].

Il bitume contenuto nel RAP è generalmente compreso tra 3 e 7% in peso ed è più duro rispetto al nuovo bitume a causa dell'ossidazione e del degrado nel tempo.

Il RAP è considerato "omogeneo" se le deviazioni standard dei vari parametri non superano determinati valori. Il RAP omogeneo può essere incluso nella produzione di nuovo conglomerato bituminoso [10].

Riciclare consiste nell'usare uno scarto di lavorazione per produrre un nuovo prodotto, diverso da quello di partenza. Il processo di riciclaggio contiene in sé una trasformazione. In campo stradale per riciclaggio si intende qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il fresato nella produzione di un nuovo conglomerato bituminoso. Dunque sarebbe più opportuno parlare di recupero o riutilizzo del fresato, dato che si ottiene altro conglomerato bituminoso.

Il recupero del fresato può avvenire sia a caldo, che a freddo. Le tecniche di produzione verranno poi illustrate nel capitolo successivo.

Il RAP utilizzato in impianto ha origini diverse e proviene anche da tecniche di demolizione diverse per cui il risultato sarà diverso in termini di:

- granulometria;
- natura degli aggregati;
- tipo di legante;
- percentuale di legante.

Il conglomerato bituminoso prodotto con l'aggiunta di RAP deve avere lo stesso livello di qualità di un conglomerato prodotto ex-novo, quindi sono necessarie analisi preliminari per dedurre informazioni sulla qualità e quantità dei costituenti. Dai campioni prelevati dai cumuli, seguendo le prescritte tecniche di campionamento, si deve eseguire l'estrazione non distruttiva del legante per verificare:

- il contenuto percentuale di bitume, riferito al peso totale del fresato su base secca;

- la viscosità dinamica;
- la penetrazione [10].

Da un punto di vista legislativo la problematica del riciclaggio fa riferimento a quanto di pertinenza nei D.L. 05/02/1997 n° 22 (Decreto Ronchi) e D.M. 05/02/1998 n° 72. Il Decreto Ronchi stabilisce i principi generali del recupero dei rifiuti non pericolosi, purché codificati all'interno del CER (Catalogo Europeo dei Rifiuti). Il conglomerato bituminoso fresato rientra nel CER e può quindi essere recuperato a norma di legge, previa autorizzazione dell'Ente competente (Regione/Provincia Ufficio Rifiuti - Settore Ecologia).

Oggi più che in passato, la conoscenza dei benefici che il riciclaggio in impianto ed in sito può dare in termini di recupero di materiale e costi di trasporto ed energia, coinvolge tutti i fattori che influenzano il ciclo di vita del prodotto finale.

Se si volesse dare una definizione di pavimentazione efficiente e duratura potremmo usare la seguente: “una pavimentazione sicura ed efficiente, rispettosa dell'ambiente e che risponda alle esigenze degli utenti attuali senza compromettere quelle delle generazioni future”.

Al fine di rispettare tale definizione, nella progettazione o riqualificazione di una pavimentazione, sarà necessario raggiungere i seguenti obiettivi:

- ottimizzazione dell'uso delle risorse naturali e riduzione del consumo di energia;

- riduzione delle emissioni che possono avere impatto negativo sull'effetto serra;
- riduzione dell'emissione di inquinanti in generale;
- miglioramento delle condizioni di salute, della sicurezza e della prevenzione dei rischi;
- miglioramento delle condizioni di comfort per gli utenti.

Nella pratica comune, oltre le ragioni ambientali sopra descritte, l'uso del riciclaggio dei materiali per la riqualificazione delle strade si sta diffondendo per le seguenti ragioni:

- ragioni economiche, in particolare si fa riferimento alla scarsità di aggregati vergini e materiale naturale, soprattutto in prossimità delle aree urbane. A questo bisogna aggiungere come sia sempre più difficile aprire nuove cave o siti di estrazione. Infine bisogna tener conto del costo dell'energia. Se pensiamo che un barile di petrolio costa più di 100 \$ e che il costo del bitume incide per il 35% sul costo di realizzazione di un'unità di conglomerato bituminoso, allora si nota immediatamente come l'energia a basso costo sia solo un ricordo del passato;
- ragioni riguardanti lo sviluppo di nuove tecnologie e mezzi, infatti le tecniche di riciclaggio, siano esse applicate in sito o in impianto, a caldo o a freddo, hanno permesso lo sviluppo di nuovi approcci costruttivi in cui è previsto l'uso di risorse che in passato erano semplicemente considerate scarti da smaltire in discarica. Inoltre hanno favorito lo sviluppo di tecnologie innovative che

permettessero l'applicazione delle tecniche suddette. Come spesso capita, lo sviluppo di queste nuove tecniche ha generato "conoscenza scientifica", portando un miglioramento in tutti quei campi che da essa vengono interessati (macchinari, prodotti, approccio progettuale);

- ragioni legali, dato che da qualche anno il riciclaggio totale o parziale di una pavimentazione è entrato a far parte di quelle alternative previste anche a livello legale. In alcuni paesi europei, dove il riciclaggio risulta più diffuso che in Italia, sono state messe a punto norme che incentivano fortemente l'uso della tecnica tutte le volte che l'intervento da effettuare lo permette [9].

4.6. Impianti e tecniche produttive

4.6.1. Il ciclo produttivo dei conglomerati bituminosi tradizionali

La gran parte della lavorazione per la produzione dei conglomerati bituminosi viene effettuata per mezzo di un impianto a ciclo chiuso completamente automatizzato e governato da una centrale di comando posta ad immediato ridosso dell'impianto stesso. Quest'ultimo, generalmente di considerevoli dimensioni, si eleva per altezze non inferiori a 10 metri, ed è completamente circondato da passerelle e ripiani per consentire l'ispezione e la manutenzione delle singole parti che lo compongono. Le unità produttive solitamente occupano superfici molto

ampie (diverse migliaia di metri quadrati) per le necessità di effettuare lo stoccaggio degli inerti e di disporre di estesi spazi interni per la movimentazione e il carico delle materie prime, per lo scarico dei prodotti finiti, nonché per l'allocazione degli impianti di produzione e dei silos di stoccaggio.

In aree apposite delle unità produttive si trovano solitamente piccole officine meccaniche dotate di attrezzature, utensili e gruppi di saldatura ossiacetilenica necessari per le operazioni di manutenzione ordinaria dell'impianto, effettuabile solo ad impianto fermo ed affidata, generalmente, a ditte esterne.

Il conglomerato bituminoso è prodotto sempre su richiesta, ma poiché l'impianto non può mai essere fermato (salvo rare eccezioni) a causa dei lunghi tempi necessari per il suo riavvio, in assenza di richieste è mantenuto sempre al minimo livello di funzionamento [1].

Il risultato finale dipende anche dal loro buon funzionamento e dalla predisposizione di un piano di controlli delle fasi del processo. La produzione può arrivare a 100 m³/giorno [8].

La classificazione degli impianti di produzione dei conglomerati bituminosi può essere operata in base ai seguenti fattori:

- tipologia delle macchine utilizzate per il mescolamento a caldo del bitume con gli inerti. Tali macchinari possono essere suddivisi in due grandi categorie a seconda che la produzione sia realizzata con mescolamento discontinuo oppure continuo. Nel primo caso gli inerti, dopo essere stati essiccati, vagliati e pesati, vengono

mescolati tra loro e col bitume fino ad ottenere un impasto omogeneo; il conglomerato ottenuto viene poi scaricato dal mescolatore. Nel secondo caso gli aggregati, dopo i preliminari trattamenti, vengono prelevati direttamente dai silos mediante saracinesche e alimentatori a nastro ed immessi, insieme al bitume, in un mescolatore ad azione continua;

- tipologia dell'impianto, ovvero l'impianto può essere fisso o mobile. Gli impianti di tipo mobile sono caratterizzati dal fatto di poter avere, a differenza di quelli di tipo fisso, le varie parti equipaggiate con ruote pneumatiche e freni che ne consentono il trasporto oppure essere dotati semplicemente di ruote metalliche idonee solo a piccoli spostamenti;
- potenzialità produttiva dell'impianto, che può variare da poche tonnellate/ora ad oltre 200 tonnellate/ora.

Il processo di produzione comprende diverse fasi di lavoro, di seguito riassunte nei successivi paragrafi.

4.6.1.1. Approvvigionamento e pretrattamento degli inerti

Negli impianti di produzione del conglomerato bituminoso, le materie prime del ciclo di produzione non sono prodotte in loco, ma vengono generalmente comprate da ditte esterne e stoccate in apposite aree interne all'impianto stesso (Fig. 4.6) [1]. Da qui gli inerti vergini, che si classificano in base alla loro granulometria in filler, sabbie, graniglia, etc. vengono trasportate a mezzo di pale meccaniche e caricate

in apposite tramogge, che alimentano, con nastri trasportatori, un essiccatore (Fig. 4.6) ovvero un forno a tamburo.



Fig. 4.6 - A sinistra: Area di stoccaggio inerti; a destra: ingresso degli inerti nell'essiccatore [2].

Tale forno è costituito da un cilindro d'acciaio rotante, inclinato nel senso di avanzamento del materiale, dotato di palettatura interna che solleva il materiale e lo riscalda fino ad eliminare l'acqua in eccesso. Esso rappresenta il cuore del sistema di produzione. Infatti dall'efficienza dell'essiccatore dipende interamente la capacità produttiva dell'impianto [11].

Durante questa operazione l'eventuale filler presente viene aspirato da potenti correnti d'aria (cicloni) che lo recuperano [8]. Dopo il preliminare trattamento di riscaldamento ed essiccamento nel quale raggiungono temperature di $120\div 150^{\circ}\text{C}$, i materiali passano, mediante un elevatore a caldo, nella parte più alta della torre di mescolamento. Qui gli aggregati caldi sono sottoposti ad un ulteriore vaglio di controllo e separazione delle pezzature ottenute, nonostante abbiano già subito una iniziale vagliatura nel sito in cui vengono prodotti. Ciò si ottiene di norma attraverso l'impiego di macchine di diversa tipologia: vagli piani,

costituiti da una o più lamiere forate e sovrapposte, collocate su un telaio e messe in vibrazione, oppure vagli rotativi in cui il materiale da trattare è attraversato da un cilindro cavo rotante con superficie in lamiera forata.

I materiali così ottenuti vengono poi stoccati in una serie di tramogge da cui, attraverso spillamenti successivi, vengono dosati i quantitativi per le singole pezzature, in modo da ricostruire l'esatta curva granulometrica.

Solitamente questa fase del ciclo produttivo richiede la presenza di non più di una persona addetta alla movimentazione della pala meccanica. Tutte le altre operazioni condotte in tale fase vengono, infatti, eseguite in modo meccanizzato e controllato da una cabina centralizzata [1].

4.6.1.2. Stoccaggio del bitume

Il bitume, trasportato in stato semisolido da autocisterne, è stoccato in serbatoi metallici posti in aree ben delimitate (Fig. 4.7). I serbatoi sono coibentati con lane di roccia ad alta densità e rivestite con un mantello di alluminio; inoltre sono predisposte con lo scarico di fondo per il collegamento in serie di più cisterne tra loro. Sono poi previste le prese per effettuare il carico, il prelievo e la circolazione per mezzo di una pompa ad ingranaggi riscaldata.

Il bitume viene riscaldato a $130\div 150^{\circ}\text{C}$ dalla caldaia oleotermica alimentata con olio combustibile B.T.Z. (olio denso a basso contenuto di zolfo) e successivamente mantenuto a temperatura costante con olio

diatermico per omogeneizzarne la composizione. Tramite una pompa volumetrica viene poi inviato e dosato nel mescolatore. Tutto il ciclo dei bitumi è controllato dalla cabina centrale: una sola persona è di norma addetta al controllo dello scarico dell'autocisterna [1].



Fig. 4.7 – Serbatoi stoccaggio bitume.

4.6.1.3. Mescolamento degli inerti con il bitume

Gli inerti, a temperatura di $120\div 150^{\circ}\text{C}$, vengono addizionati con il filler proveniente dai cicloni e dagli appositi serbatoi. Inerti e filler vengono miscelati con il bitume nel nucleo di miscelazione (Fig. 4.8, la temperatura è di $140\div 160^{\circ}\text{C}$) costituito generalmente da vasche con il fondo apribile per lo scarico del materiale impastato.

La miscelazione si ottiene per l'azione di alberi paralleli rotanti (30-80 giri/min) muniti di palette o braccia. Le pareti interne del mescolatore, come pure i componenti rotanti, sono di acciaio al manganese dovendo resistere alla violenta azione dell'usura causata dal mescolamento.

I miscelatori consentono di ottenere, quale prodotto finito, un impasto omogeneo: il conglomerato bituminoso. Quest'ultimo fuoriesce dalla zona di mescolamento mediante un apposito convogliatore, può essere trasportato alle tramogge di carico (Fig. 4.9) e quindi direttamente agli automezzi (Fig. 4.10), oppure inviato ad un silos per lo stoccaggio provvisorio. L'intero processo viene normalmente governato dalla centrale di comando completamente automatizzata: esso non richiede, pertanto, la presenza di altri operatori [1].



Fig. 4.8 - Impianto di mescolamento del bitume con gli inerti [1].



Fig. 4.9 - Tramoggia di carico con attigua cabina comandi.



Fig. 4.10 - A sinistra: Torre di confezionamento; a destra: scarico del bitume in automezzo [2].

Il ciclo produttivo descritto è sinteticamente schematizzato.

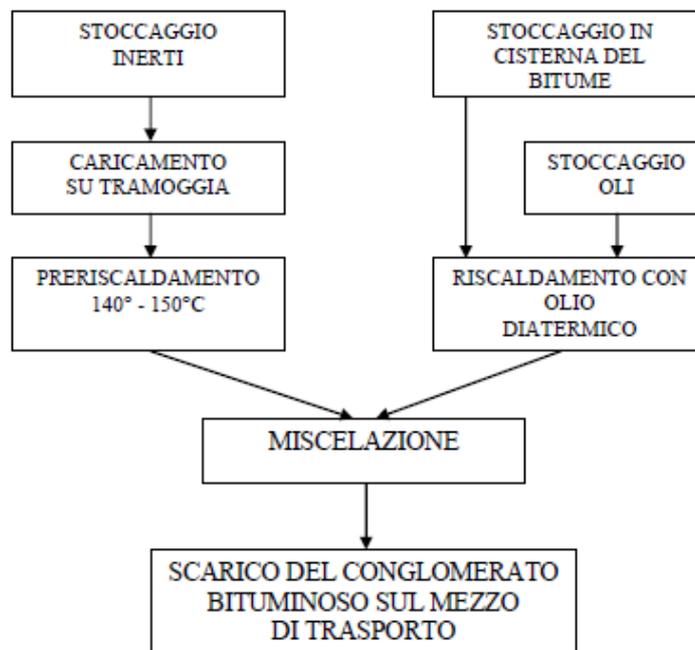


Fig. 4.11 - Diagramma di flusso del ciclo produttivo del conglomerato bituminoso.

Tale ciclo fa riferimento alla categoria di impianti “discontinui”, che si differenziano dagli impianti “continui” per il semplice fatto che in questi ultimi mescolatore ed essiccatore compongono un’unica unità operativa (drum mixer), ovvero nel tamburo essiccatore avviene anche la miscelazione. La diffusione degli impianti continui, direttamente nei cantieri stradali, trova motivazione nell’abbattimento dei costi per la maggiore semplicità dell’impianto e nella diminuzione della spesa energetica di esercizio [8].

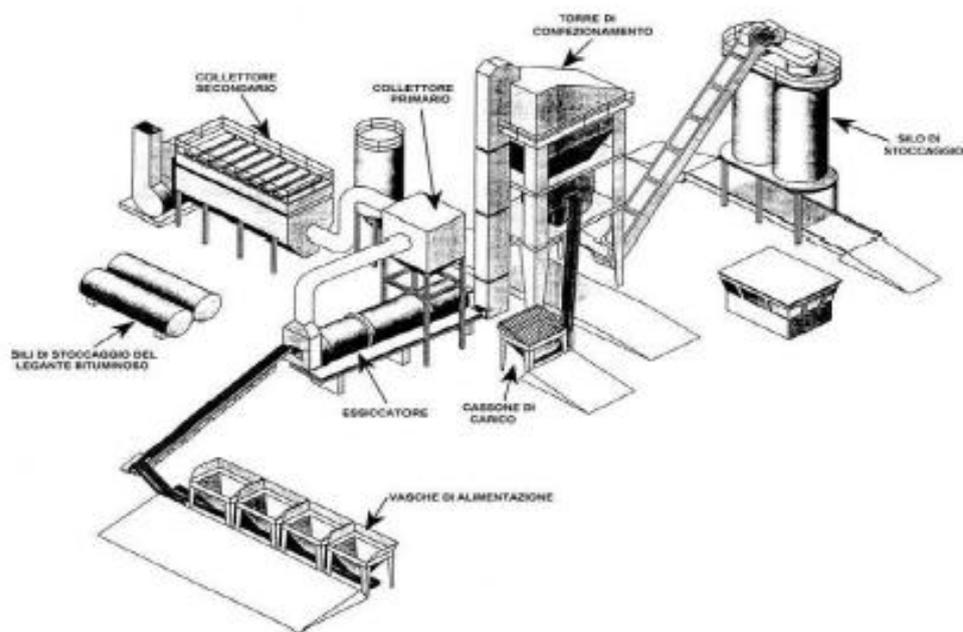


Fig. 4.12 – Schema di un impianto discontinuo [2].

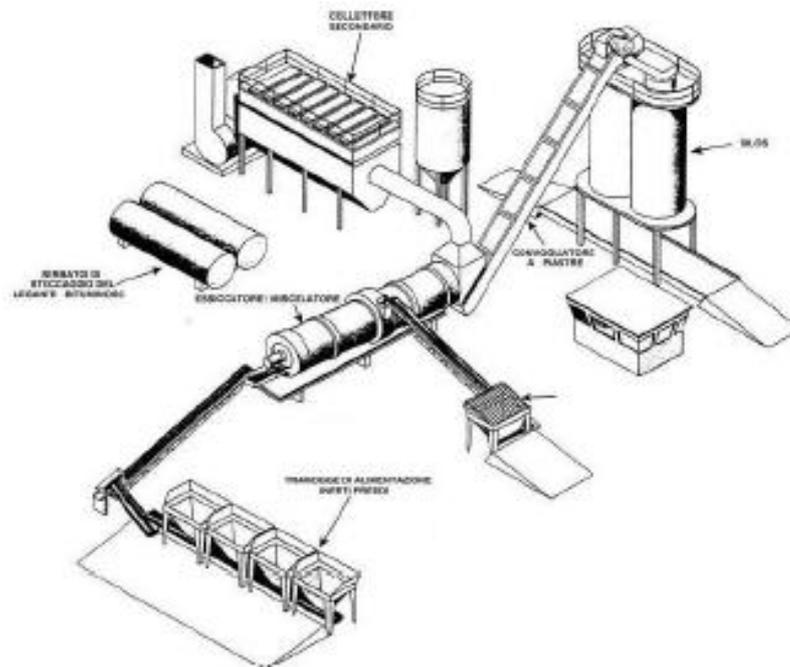


Fig. 4.13 – Schema di un impianto continuo [2].

4.6.2. Il conglomerato bituminoso con RAP: tecniche di riciclaggio

Come già detto nel capitolo precedente, col termine “riciclare”, si intende qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il fresato, nella produzione di un nuovo conglomerato bituminoso. Nel rispetto delle specifiche metodologie produttive, si può sicuramente affermare che il fresato può essere recuperato e reimpiegato totalmente con due grandi vantaggi per l’ambiente:

- riduzione dell’inquinamento atmosferico;
- riduzione dell’estrazione di materiali vergini.

Inoltre, l'impiego di materiali e tecnologie atte a realizzare il riciclaggio delle miscele bituminose ottenute dalle pavimentazioni ammalorate, comporta una riduzione dei trasporti, un contenimento del ricorso a materiali nuovi, nonché una diminuzione dei quantitativi di rifiuto da smaltire in discariche costose ed impattanti.

L'operazione di riciclaggio del fresato, può essere eseguita in diverse modalità a seconda del sito di produzione e a seconda della tecnica impiegata.

Nel primo caso la classificazione è la seguente:

- riciclaggio in appositi impianti;
- riciclaggio su strada tramite l'uso di speciali macchinari semoventi che contestualmente fresano, impastano e stendono il prodotto.

Nel secondo caso la classificazione è la seguente:

- riciclaggio tramite riscaldamento dei materiali (“riciclaggio a caldo”);
- riciclaggio senza preventivo riscaldamento dei materiali, bensì con l'aggiunta di leganti (emulsioni bituminose o bitumi schiumati) e rigeneranti (“riciclaggio a freddo”) [11].

4.6.2.1. Tecniche di riciclaggio in impianto fisso

Nel caso di riciclaggio in impianto fisso il materiale fresato dalla pavimentazione deve essere trasportato dal luogo di recupero all'impianto stesso per poi essere inserito nel ciclo produttivo e quindi

riutilizzato. I principali vantaggi del riciclaggio in impianto fisso sono i seguenti:

- alta qualità tecnica del processo di riciclaggio, infatti la frantumazione, il setaccio e la miscela degli aggregati risultano essere migliori ed inoltre si ha la possibilità di effettuare maggiori analisi di laboratorio, e dunque controlli di qualità, sul materiale fresato e sul prodotto finale;
- il prodotto finale risulta essere più omogeneo e si ha la possibilità di uno stoccaggio temporaneo;
- si ha una maggiore flessibilità nella produzione di diverse miscele e dal punto di vista operativo.

Allo stesso tempo sono da menzionare i difetti del riciclaggio in impianto fisso:

- si hanno maggiori costi di trasporto. Il materiale deve essere trasportato dal cantiere operativo all'impianto fisso e riportato in cantiere una volta realizzata la miscela;
- si hanno maggiori costi di stoccaggio e gestione del materiale in cantiere;
- in impianto, nonostante l'omogeneità della miscela, non è possibile creare miscele con percentuali di riutilizzo del RAP superiori al 50÷60%;
- l'impatto sul traffico veicolare in prossimità del cantiere risulta maggiore [9].

A seconda della temperatura a cui viene lavorato il RAP distinguiamo:

- riciclaggio in impianto fisso a caldo;
- riciclaggio in impianto fisso a freddo.

Le soluzioni di riciclaggio si possono effettuare in impianti del tutto nuovi o, debitamente studiate come implementazioni, in impianti esistenti. Ad esempio nel caso degli impianti di produzione a caldo di conglomerato bituminoso devono essere opportunamente modificati perché bisogna evitare di esporre il *RAP* a temperature superiori a quelle dell'infiammabilità del vecchio bitume (250÷280 °C), dato che si produrrebbero VOC (composti organici volatili) [10].

Tecnica di riciclaggio in impianto fisso a caldo

Il RAP viene trasportato all'impianto di produzione del conglomerato a caldo, lì viene inserito nel processo di produzione della nuova miscela mescolando con aggregati vergini surriscaldati (in modo tale da innalzare la temperatura, altrimenti insufficiente, del conglomerato fresato), bitume vergine ed eventualmente con un rigenerante e con acqua e cemento. Il RAP prima di essere inserito nel processo di produzione viene asciugato e riscaldato. Queste operazioni di essiccamento e riscaldamento portano ad i seguenti vantaggi:

- nella miscela non è presente acqua residua che possa intaccare i fenomeni di adesione e coesione del nuovo bitume;

- con il riscaldamento si favorisce il rammollimento del bitume proveniente dal RAP favorendo le operazioni di rigenerazione del RAP stesso [9].

Tecnica di riciclaggio in impianto fisso a freddo

La rigenerazione in impianto fisso rimane sempre un'opzione da prendere in considerazione quando il riciclaggio è possibile, in particolare nel caso in cui si debba rigenerare una miscela di materiali riciclati e vergini, e specialmente quando la rigenerazione avvenga con bitume schiumato a fini di stoccaggio del materiale riciclato per un uso successivo.

I leganti idrocarburici utilizzati in questo metodo sono le emulsioni bituminose ed il bitume schiumato. Il prodotto finale rimane bagnato e nel caso in cui il grado di invecchiamento del bitume proveniente dal RAP non è eccessivo, è possibile utilizzare un rigenerante per favorire la riattivazione del vecchio bitume [9].

4.6.2.2. Tecniche di riciclaggio in sito

Nel riciclaggio in sito i costi di trasporto e gestione del materiale fresato sono ridotti al minimo, l'impatto sulla viabilità in prossimità del cantiere risulta minimo ed occasionale e si può arrivare a riciclare il 100% del RAP. Questi sono i principali vantaggi che rendono il riciclaggio in sito una delle alternative di intervento più appetibili [9].

Anche questa volta distinguiamo in base alla temperatura in:

- riciclaggio in sito a caldo;
- riciclaggio in sito a freddo.

Negli ultimi anni si è fatta avanti una ulteriore tecnica, quella a basse temperature (riciclaggio in sito tiepido e semitiepido).

Tecnica di riciclaggio in sito a caldo

Per riciclaggio in sito a caldo si intende quella tecnica che prevede l'uso di un tamburo essiccatore del tutto simile a quello usato negli impianti fissi continui.

Le fasi principali del riciclaggio in sito a caldo sono:

- stesa sulla pavimentazione stradale di eventuali inerti vergini di correzione;
- fresatura con una o due frese a freddo fino ad alla profondità voluta;
- il RAP viene raccolto da un'unità mobile che comprende tutta la filiera di produzione della nuova miscela, compreso il silos di stoccaggio del nuovo bitume. Come nel caso degli impianti fissi, il materiale raccolto viene asciugato e riscaldato fino ad una temperatura di 140÷170°C. Il bitume di apporto viene inserito nel miscelatore all'estremità finale del tamburo;
- la miscela viene stesa per tutta la larghezza dell'area di intervento attraverso una classica vibrofinitrice;
- la miscela viene compattata secondo i metodi tradizionali.

La qualità della miscela è del tutto simile a quella che si otterrebbe in impianto fisso.

Se il riciclaggio in sito a caldo riguarda solamente gli strati superficiali della pavimentazione si parla di “termorigenerazione”. Si ha fresatura della pavimentazione, il mescolamento con o senza inerti di correzione o legante e la immediata stesa della miscela riciclata. Questo tipo di intervento, però, risulta efficiente per profondità di intervento che non superano i 4 cm.

Tale tecnica risulta parecchio utile nel caso in cui si vogliano migliorare le caratteristiche superficiali di una pavimentazione come l’aderenza e l’impermeabilità. Allo stesso tempo va ricordato che intervenendo attraverso la termorigenerazione non si produce alcun incremento di resistenza della pavimentazione.

Nell’effettuare la termorigenerazione, dopo che la pavimentazione è stata riscaldata, si hanno due metodi di mescolamento:

- scarifica e realizzazione della miscela in speciale tamburo che lavora a bassa velocità, ma sullo stesso principio del classico tamburo mescolatore per impianti fissi. In questo caso il materiale non risulta asportato ed il bitume di apporto avviene direttamente aggiunto in sito;
- frantumazione della pavimentazione e successivo passaggio in mescolatore a doppia colonna con o senza fondo. In questo caso il rivestimento degli aggregati risulta di gran lunga migliore.

L'uso di un agente rigenerante è vivamente consigliato al fine di favorire il mescolamento tra vecchio e nuovo bitume. Infine la miscela viene stesa e compattata.

In passato si è notato come questa tecnica sia risultata inefficiente solo nei casi in cui gli interventi non siano stati proceduti da indagini preliminari accurate. In particolare se i problemi riguardano gli strati profondi della pavimentazione, l'intervento di termorigenerazione risulta inutile vista la sua azione superficiale [9].

Tecnica di riciclaggio in sito a basse temperature

La tecnica del riciclaggio a basse temperature risulta essere di nuova concezione ed applicata solo da pochi anni. Essa è caratterizzata da temperature della miscela finale che vanno dagli 80 ai 90 °C per il semitiepido e da 110 a 130 °C per il tiepido. Queste temperature permettono quindi l'uso di bitume schiumato ed emulsioni bituminose. I treni di riciclaggio possono essere adattati per l'utilizzo di entrambe i leganti, i quali sono iniettati nella parte posteriore del tamburo e mescolati con il RAP preriscaldato.

I principali vantaggi di entrambe le tecniche (tiepido e semitiepido) sono:

- risparmio di energia dal 20 al 50 % rispetto alle tecniche a caldo;
- notevole riduzione nelle emissioni di gas inquinanti;

- uso del bitume a temperatura notevolmente inferiore rispetto a quella critica, nella quale si ha rilascio di sostanze idrocarburiche aromatiche.

La miscela che si ottiene risulta avere una buona lavorabilità ed i tempi di attesa per la riapertura al traffico della strada sono ridotti [9].

Tecnica di riciclaggio in sito a freddo

Tale tecnica viene utilizzata per la rigenerazione di pavimentazioni bituminose con una profondità di intervento che va da 40 a 200 mm [9].

Il riciclaggio a freddo è realizzato mediante apposite apparecchiature che consentono di miscelare in continuo il fresato bituminoso impastandolo con emulsione, cemento, acqua e inerti vergini per reintegrare la granulometria, se necessario [11].

Il materiale fresato non viene né essiccato, né preriscaldato e può essere legato con bitume, cemento o sciolto. I leganti, emulsione bituminosa o bitume schiumato e/o cemento, vengono aggiunti all'atto del mescolamento o in un mescolatore apposito. Con eccezione per pavimentazioni rurali o strade secondarie di scarsa importanza, in questa tecnica è necessario rivestire gli strati riciclati a freddo con un tappetino di usura che permetta di rispettare le specifiche tecniche in termini di aderenza [9]. I procedimenti di riciclaggio a freddo maggiormente utilizzati nelle operazioni di manutenzione della pavimentazione stradale quindi sono:

- riciclaggio a freddo in sito con bitume schiumato e cemento;

- riciclaggio a freddo in sito con emulsione e cemento.

La schiume di bitume ne incrementa la superficie specifica e lo rende più adatto ad essere mescolato con gli aggregati freddi ed umidi, mentre nel secondo caso, invece, viene additivata al fresato stradale una miscela di bitume, acqua e emulsionanti (o tensioattivi) detta tecnicamente “emulsione”. L’emulsione assicura coesione, stabilità e flessibilità al nuovo conglomerato [11].

La tecnica dello schiumato è a basso costo e riesce a far funzionare anche materiali di non eccezionale qualità. Il materiale schiumato presenta moduli di resistenza a fatica medi e la sua carenza in termini di resistenza strutturale la si risolve aumentando lo spessore. Il bitume schiumato, di colore marroncino, ha all’interno una minima quantità di cemento (circa 1,5%) che gli conferisce le resistenze necessarie nel primo periodo di vita quando la schiuma ancora non fa effetto. Ha una sola esigenza: la compattazione efficace. Il materiale trattato a freddo è più debole di quello prodotto a caldo, però permette di recuperare tutti i materiali di demolizione disponibili [10].

Le macchine riciclatrici sono frese a freddo modificate o stabilizzatrici adattate che si sono evolute nel tempo. Progettate specificamente per essere in grado di riciclare in una sola passata strati di pavimentazione di grande spessore, le moderne riciclatrici sono di norma macchine grandi e ad elevate prestazioni, montate su cingoli o su grosse ruote gommate.

Il “cuore” di una riciclatrice è costituito dal rotore di fresatura e miscelazione, che è munito di un grande numero di utensili da taglio speciali. Di norma tale rotore ruota in senso opposto a quello di marcia, polverizzando il materiale della pavimentazione esistente, come illustrato in Fig. 4.14.

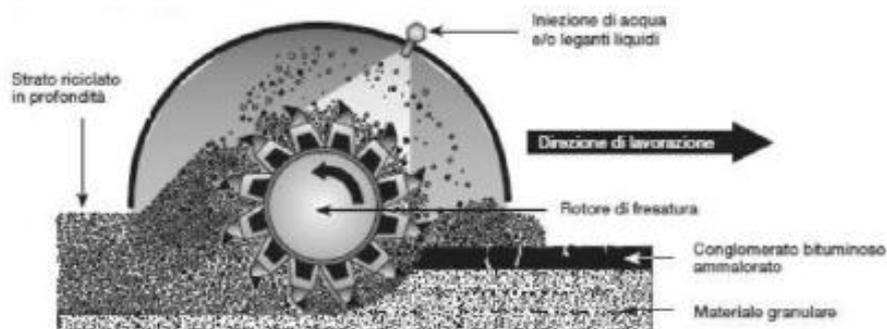


Fig. 4.14 – Il processo di riciclaggio [9].

Mentre la macchina avanza con il rullo di fresatura rotante, l'acqua, contenuta in un'autobotte collegata alla riciclatrice, viene erogata mediante un tubo flessibile e spruzzata all'interno del vano di miscelazione della riciclatrice.

La quantità dell'acqua viene dosata con precisione tramite un impianto di pompaggio controllato da microprocessore, ed il rullo rotante mescola accuratamente l'acqua con il materiale riciclato, onde ottenere il tenore di umidità necessario per raggiungere elevati gradi di costipamento. In modo simile possono essere iniettati direttamente nel vano di miscelazione anche dei leganti liquidi, quali una boiaccia

cementizia o un'emulsione bituminosa, sia singolarmente che insieme. Inoltre è possibile iniettare nel vano di miscelazione pure del bitume schiumato mediante una separata barra spruzzatrice appositamente progettata. I leganti in polvere, quali ad esempio la calce idrata, vengono normalmente sparsi sulla pavimentazione esistente, nel tratto antistante la riciclatrice. Quest'ultima passa sopra la polvere e la miscela in un'unica passata con il materiale fresato e l'acqua iniettata.

I treni di riciclaggio possono avere configurazioni diverse a seconda del tipo di applicazione e del tipo di legante impiegato.

In tutti i casi, comunque, la riciclatrice funge da locomotiva e spinge o traina l'attrezzatura ad essa agganciata mediante barre di spinta o di traino.

Il treno di riciclaggio mostrato in Fig. 4.15 viene usato quando il materiale riciclato viene stabilizzato con una boiaccia cementizia.

Prima della miscelazione, le dosi di cemento e acqua prescritte sono misurate con precisione in modo da formare una sospensione che viene quindi pompata attraverso un tubo flessibile alla riciclatrice e iniettata nel vano di miscelazione. In alternativa, il cemento può essere sparso anche in forma pulverulenta sulla pavimentazione dinanzi alla riciclatrice. In tal caso il miscelatore di sospensioni viene sostituito da un'autobotte per acqua.

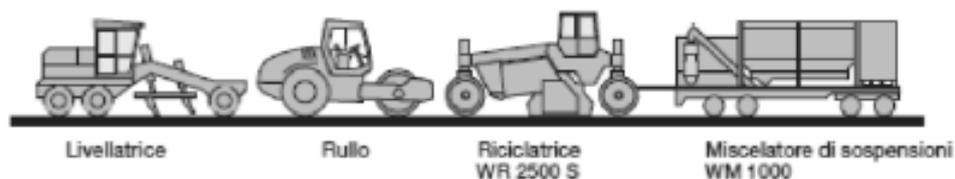


Fig. 4.15 – Tipico treno di riciclaggio per l’aggiunta di boiacca cementizia.

Il materiale uscente dalla riciclatrice viene precompattato da un rullo vibrante pesante per ottenere un grado di addensamento uniforme in tutto il materiale riciclato. Di seguito, il materiale viene profilato da una motolivellatrice prima di essere costipato da rulli vibranti e rulli gommati. Nel caso in cui si usi un’emulsione bituminosa o bitume schiumato insieme ad una boiacca cementizia, il treno di riciclaggio avrà una configurazione simile: un’autocisterna di bitume viene posizionata davanti al miscelatore di sospensioni, dal quale viene spinta. Qualora il cemento venga sparso in forma pulverulenta sulla superficie stradale antistante il treno di riciclaggio, la cisterna di bitume è agganciata direttamente alla riciclatrice, e in testa al treno spinto viene posta un’autobotte d’acqua che funge da veicolo capofila.

Se la riciclatrice è dotata di cingoli e di un banco di stesa l’utilizzo di una motolivellatrice per profilare la superficie potrebbe risultare superfluo [9].

4.6.3. Confronto fra le tecniche di riciclaggio

Negli interventi di riciclaggio, in genere, non esiste una soluzione universalmente valida. Tutto dipende dalle singole situazioni che il

tecnico trova in sito, dalle condizioni della pavimentazione, dal tipo di problema che essa presenta, dalla reperibilità o meno di materiale vergine, dalla disponibilità economica della committenza.

Dal punto di vista tecnologico, tra i vari parametri che influenzano la scelta della soluzione di riciclaggio, vale la pena ricordare i seguenti:

- natura del danno afferente la pavimentazione;
- tipo di pavimentazione;
- vita utile residua;
- dimensioni dell'intervento;
- natura, quantità, qualità ed omogeneità del conglomerato bituminoso che deve essere riciclato;
- quantità di conglomerato bituminoso da riciclare contaminato;
- organizzazione dell'intervento;
- standard qualitativo che si vuole raggiungere;
- aspetti ambientali (ubicazione ed ambiente fisico);
- reperibilità dei materiali.

Dal punto di vista economico in genere si parte da un'analisi economica del ciclo di vita della pavimentazione. In particolare si osserva la vita utile residua e la si confronta con quella che avrebbe la pavimentazione al variare degli interventi di riciclaggio.

Normalmente la rigenerazione in impianto fisso è presa in considerazione nei casi in cui il materiale riciclato deve essere usato per

la costruzione di un nuovo strato della pavimentazione, ad esempio per aumentare la portanza di una pavimentazione esistente.

I principali vantaggi offerti dal confezionamento delle miscele in un impianto fisso rispetto alla miscelazione in sito comprendono tra l'altro:

- controllo dei materiali aggiunti, infatti mentre il riciclaggio in sito permette di eseguire solo pochi controlli sul materiale recuperato da una pavimentazione esistente, confezionando le miscele in un impianto centralizzato si può ottenere un prodotto finale conforme a specifici requisiti aggiungendovi diversi tipi di aggregato. I materiali da aggiungere possono essere stoccati e testati prima della miscelazione e le rispettive percentuali possono essere modificate secondo le esigenze;
- qualità di miscelazione, dato che si possono impostare diversi parametri operativi del mescolatore forzato per variare opportunamente il tempo che il materiale trascorre nel vano di miscelazione;
- stoccabilità, specialmente nel caso di materiale trattato con bitume schiumato il prodotto miscelato può essere messo a parco e usato nel momento in cui è richiesto. Perciò viene meno l'interdipendenza fra il processo di miscelazione e quello di stesa.

La rigenerazione in sito ha acquisito popolarità grazie all'avvento di macchine riciclatrici grandi e potenti, in grado di ripristinare le pavimentazioni ad una frazione del costo dei metodi di ricostruzione

convenzionali. Inoltre, alla luce dello stato di degrado delle pavimentazioni stradali in ogni parte del mondo, la necessità di ripristinare le pavimentazioni esistenti è di gran lunga più consistente della domanda di nuove infrastrutture viarie. In conseguenza di ciò, il riciclaggio in sito è diventato in molti paesi il metodo preferito quando si tratta di recuperare tempo per smaltire l'enorme lavoro arretrato nel ripristino delle pavimentazioni. In generale gli interventi di riciclaggio in sito risultano meno costosi per le seguenti ragioni:

- assenza dei costi di trasporto;
- assenza di aree di stoccaggio del RAP;
- minore influenza del cantiere sul normale deflusso del traffico veicolare. Ciò si traduce in un minor consumo d'energia da parte degli utenti e dunque della comunità, come anche in una riduzione del tempo perso in coda, sia dai privati cittadini che dagli autotrasportatori.

Il riciclaggio a freddo in sito rappresenta la tecnica che consente il maggior risparmio in termini economici ed ambientali. L'adozione di tale tecnica consente di ottenere vantaggi in termini di:

- ✓ fattori ambientali, dato che viene riutilizzato tutto il materiale della pavimentazione esistente. Non occorre quindi trovare apposite aree di deposito, e il volume del nuovo materiale d'apporto estratto da cave è ridotto al minimo. In tal modo si limitano le deturpazioni dell'ambiente inevitabilmente causate dall'apertura di cave a cielo aperto e di cave di prestito. Viene drasticamente ridotta anche

- l'entità delle operazioni di trasporto. Il consumo globale di energia viene pertanto ridotto significativamente, così come l'azione deletoria sulla rete viaria dovuta al transito dei mezzi di trasporto;
- ✓ qualità dello strato riciclato, perché si ottiene una miscelazione di elevata e costante qualità dei materiali in sito con acqua e leganti. I sistemi di pompaggio controllati da microprocessore permettono un dosaggio preciso dei liquidi aggiunti. Il materiale riciclato e gli additivi vengono miscelati bene all'interno del vano di miscelazione;
 - ✓ integrità strutturale, in quanto il processo di riciclaggio a freddo genera strati legati spessi ed omogenei che non contengono interfacce deboli fra gli strati più sottili della pavimentazione;
 - ✓ minimo impatto sul sottofondo, rispetto a quello degli interventi di ripristino eseguiti con macchine operatrici convenzionali. Il riciclaggio a freddo è di norma un'operazione a singola passata. Usando una riciclatrice cingolata, i cingoli posteriori passano solo una volta sul sottofondo scoperto. Una riciclatrice gommata sparge il materiale dietro la macchina evitando quindi ogni contatto fra i pneumatici ed il sottofondo scoperto (la rilavorazione del materiale della pavimentazione con macchinari convenzionali sottopone il sottofondo ad elevati carichi ripetuti, ai quali possono conseguire deformazioni che rendono necessari scavi e riporti);
 - ✓ tempi di costruzione più brevi, essendo le riciclatrici capaci di elevate produzioni giornaliere che li accorciano in maniera

significativa, se paragonati agli altri metodi di ripristino. Tempi di costruzione più brevi riducono i costi di progetto, oltre ad offrire vantaggi immateriali per gli utenti della strada: vengono infatti ridotti al minimo i disagi arrecati dai lavori in corso;

- ✓ sicurezza del traffico, uno dei vantaggi più importanti garantito da questo processo. L'intero treno di riciclaggio può operare su una sola corsia di marcia. Nel caso di strade a due corsie, ad esempio, l'intervento di riciclaggio può essere eseguito su una semicarreggiata durante il giorno e l'intera carreggiata, inclusa la corsia riciclata finita, può essere riaperta al traffico all'imbrunire;
- ✓ efficacia in termini di costo, sulla base dell'insieme dei vantaggi sopra descritti [9].

Tuttavia tale tecnica non è ancora diffusa nei principali Paesi Europei rispetto al riciclaggio a caldo e ciò è dovuto al fatto che solamente in questi ultimi anni è stata posta al centro dell'attenzione degli operatori del settore (Tab. 4.2).

Tab.4.2 – Tecniche di riciclaggio diffuse in alcuni Paesi Europei.

| | Austria | Belgio | Danimarca | Finlandia | Francia | Olanda | Svezia | Regno Unito |
|-------------------------------------|----------|---------|-----------|-----------|---------|---------|----------|-------------|
| Ricicl. a caldo in impianto | diffuso | diffuso | diffuso | diffuso | diffuso | diffuso | | Diffuso |
| Ricicl. a caldo in sito | limitato | | diffuso | diffuso | diffuso | diffuso | diffuso | limitato |
| Ricicl. a freddo in impianto | | | | | diffuso | | diffuso | Limitato |
| Ricicl. a freddo in sito | limitato | | | | diffuso | | Limitato | |

References

- [1] Arcardini M., Prof. La Forgia D., Ing. Donateo T., Tesi di laurea “*Metodi per la riduzione delle emissioni tossiche durante la stesa e la lavorazione dell’asfalto*”, Università degli Studi di Lecce, 2005.
- [2] Graziano F., Prof. Di Mino G., Tesi di laurea “*Life Cycle Assessment dei conglomerati bituminosi per uso stradale*”, Università degli Studi di Palermo, 2012.
- [3] Rapino F., Prof. Dondi G., Tesi di laurea “*Le pavimentazioni stradali per la viabilità in ambito urbano*”, Università degli Studi di Bologna, 2008.
- [4] Ing. Celauro C., Prof. Boscaino G., Dispensa del corso “*Laboratorio di materiali stradali*”, Università degli Studi di Palermo, 2007.
- [5] Università degli Studi di Palermo, Università degli Studi della Basilicata, Università degli Studi di Bologna, Progetto di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN) “*Catalogo prestazionale dei manti bituminosi superficiali*”, 2001.
- [6] Di Figlia A., Prof. Di Mino G., Tesi di laurea “*Analisi comparativa di conglomerati bituminosi per strato di usura mediante la prova*”

- wheel tracker (UNI EN 12697-22)*”, Università degli Studi di Palermo, 2009.
- [7] Ferrari P., Giannini F., “*Corpo stradale e pavimentazioni vol.2*” ISEDI, 1996.
- [8] Prof. Coni M., Dispensa del corso “*Sovrastrutture di strade, ferrovie ed aeroporti*”, Università degli Studi di Cagliari, 2010.
- [9] Valagussa S., Prof. Crispino M., Tesi di laurea “*Indagine sulle tecnologie di riciclaggio a freddo e sui conglomerati bituminosi tiepidi*”, Università degli Studi di Milano, 2010.
- [10] Cacchioli M., “*A tempo di RAP*”, Quarry & Construction, Novembre 2008.
- [11] Pavimental S.p.A., “*Stima delle emissioni e del risparmio di CO2 de-rivanti dall’adozione di tecniche di riciclaggio in sito della pavimen-tazione stradale*”, 2009.
- [12] H.A. Barnes; J. F. Hutton and K.Walters. “*An Introduction to Rheology*”, Elsevier, Amsterdam, 1989.
- [13] M.C. Cavalcante Lucena, S.A. Soares, J.B. Soares, L.F.M. Leite. “*Reologia De Asfaltos Brasileiros Puros E Modificados Por Sbs*”,

REOLOGIA DE ASFALTOS BRASILEIROS PUROS E MODIFICADOS POR SBS. XVIII ANPET, Congresso de pesquisa e ensino em transportes.

- [14] C.A. Bell, Y. AbWahab, M.E. Cristi, D. Sosnovske. “*Selection of laboratory aging procedures for asphalt-aggregate mixtures*”, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-383, National Research Council, Washington, 1994..
- [15] C.A.Bell and D. Sosnovske. “*Aging: Binder validation*”, Oregon State university, Strategic Highway research Program, National Research Council, Washington, 1994.
- [16] CALTRANS, State of California Department of Transportation. “*Uses of Scrap Tire Rubber. State of the Technology and Best Practises*”, Materials Engineering and Testing Services, 2005.
- [17] J.F. Corté and M.T. Goux. “*Design of pavement structures: The French technical guide*”, Journal of the Transportatin Research Board, Vol. 1539, pp. 116-124, 1996.
- [18] M. De Beer, C. Fisher, F.J. Jooste. “*Determination of pneumatic tire/pavement interface contac stresses under moving loads and some effects with thin asphalt surface layers*”, Proceedings 8th

International Conference on Asphalt Pavements, University of Washington, pp. 179-227, 1997.

- [19] M. De Beer, C. Fisher, L. Kannemeyer. “*Tyre pavement interface contact stresses on flexible pavements – quo vadis?*”, Roads the Arteries of Africa: 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Sun City, 2004.
- [20] R.A. Douglas, D. Alabaster, N. Charters. “*Measured tire/road contact stresses characterized by tyre type, wheel load and inflation pressure*”, Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Toronto, 2008.
- [21] R.G. Hicks, F.N. Finn, C.L. Monismith, R.B. Leahy. “*Validation of SHRP binder specification through mix testing*”, Journal of Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 62, pp. 565-614, 1993.
- [22] Strategic Highway Research Program, SHRP A-369. “*Binder characterization and evaluation*”, Asphalt Research Program, National Research, Council, Washington, 1994.

Maintenance and Rehabilitation

5.1. Introduction

The combined effects of traffic loading and the climate damage every pavement, no matter how well-designed/constructed to deteriorate over time. *Maintenance and rehabilitation* are what it usually uses to slow down or reset this deterioration process. *Maintenance* actions, such as crack sealing, joint sealing, fog seals and patching help slow the rate of deterioration by identifying and addressing specific pavement deficiencies that contribute to overall deterioration. *Rehabilitation* is the act of repairing portions of an existing pavement to reset the deterioration process. For instance, removing and replacing the wearing course in a pavement provides new wearing course material on which the deterioration process begins anew.

Road infrastructure management guarantees the fully functional of the road in terms of reliability, users' safety perception and the efficiency of such good.

Planning maintenance activities means identifying a strategy that allow to reach technical and social objectives according to economic limit, both in terms of financial means and time deadline. Therefore road management is a decision process aiming at strike a working compromise.

The feasibility of maintenance activities on road infrastructure requires the use of methods based on meticulous calculus originating from technical and economic criteria.

5.2. La manutenzione delle pavimentazioni stradali flessibili

La trattazione della manutenzione delle pavimentazioni flessibili è scandita dai seguenti argomenti:

- proprietà ed indicatori di stato;
- le tecniche di rilevamento;
- i degradi superficiali;
- la diagnostica;
- la valutazione dei degradi;
- le tecniche di intervento;
- i costi di intervento.

La manutenzione stradale è il complesso di azioni tese a conservare le caratteristiche funzionali e strutturali della strada [1].

L'insieme delle azioni rivolte alla manutenzione delle pavimentazioni, che rappresenta una parte cospicua quando non preponderante di quella destinata alle altre componenti del sistema stradale sono tese a conseguire alcuni obiettivi [1].

Tali obiettivi sono:

- mantenere le caratteristiche geometriche di progetto (quote e pendenza geodetica) ed eseguite in costruzione della superficie stradale [*regolarità*];
- prevenire il decadimento o ripristinare un valore ammissibile della rugosità della superficie stradale [*aderenza*];
- ripristinare la resistenza meccanica di progetto della sovrastruttura ridotta dall'esercizio [*portanza*];
- prevenire con riparazioni di piccola entità danni e degradi in grado di provocare una riduzione della resistenza meccanica della sovrastruttura;
- migliorare o ripristinare le caratteristiche acustiche della superficie stradale [*rumorosità*].

La manutenzione si suddivide in ordinaria e straordinaria: tra queste sussiste una importante distinzione concettuale [BOLLETTINO UFFICIALE Consiglio Nazionale delle Ricerche n.125/1988 (1988) – Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale]. La manutenzione ordinaria include tutti quegli interventi che non modificano il progetto originario.

$$(Vita Utile) Progetto = (Vita Utile) Post Intervento$$

La manutenzione straordinaria include tutti quegli interventi che modificano qualitativamente e/o quantitativamente il progetto originario.

$$(Vita\ Utile)\ Residua \leq (Vita\ Utile)\ Residua\ Post\ Intervento$$

Evidentemente questi interventi implicano un nuovo progetto da eseguire, diverso da quello iniziale.

È utile ricordare come questa distinzione si rispecchi nell'accezione statunitense dei termini *maintenance* e *rehabilitation* [Pavement Guide WSDOT].

*Pavement **maintenance** describes all the methods and techniques used to preserve pavement condition, safety and ride quality, and therefore aid a pavement in achieving its design life.*

*Pavement **rehabilitation** makes a structural or functional enhancement of a pavement condition which produces a substantial extension in service life [2].*

5.2.1. Proprietà fondamentali delle pavimentazioni

Le prestazioni offerte dalla pavimentazione stradale si esprimono in termini di: *sicurezza; comfort; economia del trasporto; eco-compatibilità.*

A ciascun elemento di prestazione sono riconducibili le proprietà fondamentali della pavimentazione

- Sicurezza → *aderenza, regolarità, portanza*
- Comfort → *regolarità, portanza*
- Economia Del Trasporto → *regolarità, portanza*

➤ Eco-Compatibilità → *rumorosità*

Le proprietà fondamentali sono l'oggetto essenziale della scienza della manutenzione stradale giacché tutte le azioni d'intervento sono rivolte al ripristino, al mantenimento e al potenziamento di tali proprietà.

Portanza. È la proprietà di una pavimentazione che permette di sopportare i carichi meccanici e la loro ripetizione nel tempo in un prestabilito periodo, reagendo alle sollecitazioni indotte dal passaggio dei veicoli, senza superare una certa soglia di deformazione.

Il suo valore dipende dal numero di strati e dai corrispondenti spessori della sovrastruttura stradale, dalla natura meccanica, fisica e reologica dei materiali costituenti e del terreno di sottofondo, dalle condizioni ambientali.

Regolarità. È la proprietà di una pavimentazione atta a garantire, in fase di esercizio, le quote assegnate nello stadio di progetto e realizzate durante la costruzione.

Il suo valore dipende dalle tecniche e dalle modalità operative di messa in opera della pavimentazione nonché dalle caratteristiche meccaniche e reologiche dei materiali costruttivi.

Aderenza. È la proprietà di una pavimentazione atta a garantire, in qualsiasi condizione meteorologica e di guida, un adeguato livello del coefficiente di aderenza tra pneumatico e superficie viabile

Il suo valore dipende, in relazione al materiale, dalle asperità delle superfici dei grani costituenti lo strato di usura e dalla asperità della

superficie viabile nel suo complesso, denominate microtessitura e macrotessitura.

Rumorosità. È la proprietà di una pavimentazione atta a garantire, in fase di esercizio, un livello di emissione acustica, generata al contatto tra pneumatico e manto viabile (rumore di rotolamento), inferiore ad un limite prefissato.

Il suo valore dipende essenzialmente dalla composizione granulometrica della miscela di inerti costituente lo strato di usura.

5.2.2. Gli indicatori di stato

In riferimento alle proprietà di portanza, regolarità ed aderenza e rumorosità, si individuano specifici indicatori di stato, la cui rilevazione e quantificazione consente di valutare lo stato della funzionalità della pavimentazione. Tali indicatori sono:

- Modulo elastico, E
- International Roughness Index, IRI
- Coefficiente di Aderenza Trasversale, CAT
- Livello acustico equivalente, Leq(A)

5.2.3. Tecniche di rilevamento

La misurazione dei valori degli indicatori di stato avviene grazie all'impiego di sofisticate apparecchiature montate su appositi veicoli.

Il sistema di rilevazione e misurazione è definito come mezzo ad alto rendimento, per la rapidità di acquisizione e per la mole di dati raccolta.

I più utilizzati per ogni compito specifico sono:

- Falling Weight Deflectometer (**FWD**) → **E**
- Automatic Road ANalyzer (**ARAN**) → **IRI**
- SURvey Machine for Macrotecture & Skid (**SUMMS**) → **CAT**
- Sideway Coefficient Roughness Index Machine (**SCRIM**) → **CAT**

5.3. I degradi

Per individuare tra i degradi delle pavimentazioni quelli che più di altri incidono sulla sicurezza o che meritano interventi prioritari, si impongono delle procedure di rilevamento rapide e sistematiche e, quindi, è opportuno che siano disponibili strumenti capaci di fornire importanti informazioni al riguardo. Per effettuare un'analisi globale del problema, oltre allo studio delle caratteristiche delle pavimentazioni stradali sono stati presi in considerazione in primo luogo i più significativi riferimenti in letteratura riguardo ai cosiddetti Cataloghi dei Degradi. Questi si presentano come veri e propri documenti descrittivi atti all'individuazione e quantificazione del degrado stradale.

Tra tutti i cataloghi presenti in letteratura sono stati considerati quelli che assumono particolare interesse, ovvero, il catalogo francese e

infine quello statunitense in quanto, espressione di normative particolarmente avanzate:

- S.H.R.P. - Distress identification manual for the long-term pavement performance project;
- S.E.T.R.A. - Entretien preventif du reseau routier national.

È stato inoltre considerato il catalogo SOL.DI. redatto dal medesimo autore del presente lavoro durante il lavoro di tesi svolto nell'ambito della laurea magistrale [3].

I degradi sono classificati secondo la principale proprietà investita, ovvero regolarità longitudinale, regolarità trasversale, aderenza, portanza e degradazioni superficiali. Le categorie individuate sono pertanto le seguenti:

- *Scivolosità del manto*
- *Degradazioni del rivestimento*
- *Deformazioni del rivestimento*
- *Degradazioni strutturali*
- *Riparazioni*

Per ogni categoria sono elencati i degradi che vi appartengono:

Scivolosità del manto: levigazione degli inerti, rifluimento del legante.

Degrado del rivestimento: sgranamento, spogliamento, essudazione d'acqua e pompaggio, fessurazione in giunto, fessurazione a blocchi, buche superficiali, distacchi superficiali.

Deformazione del rivestimento: ondulazioni longitudinali, ondulazioni trasversali (ormaie), avvallamenti, corrugamenti, depressioni.

Rappezzo: rappezzi.

Degrado strutturale: fessurazioni trasversali, fessurazioni longitudinali, fessurazioni reticolari, buche profonde, cedimenti.

Tab. 5.1 – Degradi delle pavimentazioni stradali flessibili

| DEGRADO | PRINCIPALE PROPRIETÀ INVESTITA | CATEGORIA |
|--|---|--------------------------------------|
| Levigazione degli inerti | Aderenza | <i>Scivolosità del manto</i> |
| Rifluimento di legante | Aderenza | <i>Scivolosità del manto</i> |
| Sgranamento | Aderenza | <i>Degrado del rivestimento</i> |
| Spogliamento | Aderenza | <i>Degrado del rivestimento</i> |
| Essudazione acqua e pompaggio | Aderenza | <i>Degrado del rivestimento</i> |
| Fessurazione in giunto | Regolarità | <i>Degrado del rivestimento</i> |
| Fessurazione a blocchi | Regolarità | <i>Degrado del rivestimento</i> |
| Buche superficiali | Regolarità | <i>Deformazione del rivestimento</i> |
| Distacchi superficiali | Regolarità | <i>Degrado del rivestimento</i> |
| Ondulazioni longitudinali | Regolarità | <i>Deformazione del rivestimento</i> |
| Ormaie | Regolarità | <i>Deformazione del rivestimento</i> |
| Avvallamenti | Regolarità | <i>Deformazione del rivestimento</i> |
| Corrugamenti | Regolarità | <i>Deformazione del rivestimento</i> |
| Depressioni | Regolarità | <i>Deformazione del rivestimento</i> |
| Rappezzi | Regolarità | <i>Rappezzo</i> |
| Fessurazioni trasversali | Portanza | <i>Degrado strutturale</i> |
| Fessurazioni longitudinali | Portanza | <i>Degrado strutturale</i> |
| Fessurazioni reticolari | Portanza | <i>Degrado strutturale</i> |
| Buche profonde | Portanza | <i>Degrado strutturale</i> |
| Cedimenti | Portanza | <i>Degrado strutturale</i> |

Per ognuno di tali degradi sono consigliabili differenti interventi di manutenzione che consentano il ripristino della proprietà coinvolta. È altresì necessario sottolineare che soltanto in rare occasioni è possibile osservare degradi isolati. È piuttosto usuale, invece, essere in presenza di degradi compositi che necessitano quindi di interventi ben studiati a seconda delle caratteristiche del degrado di volta in volta mostrate. Non esistono, ovvero, soluzioni precostituite: è compito dell'ingegnere stradale studiare i diversi casi che si presentano.

5.4. Tecniche di intervento

La sovrastruttura stradale è una struttura e nelle sue interazioni con l'utilizzatore è un elemento di tipo evolutivo, cambia cioè nel tempo il suo modo di funzionare a causa del degrado delle sue parti componenti; per le variazioni dovute al variare delle abitudini degli utilizzatori ed alle caratteristiche dei veicoli che essi usano.

Numerosi studi hanno dimostrato come il degrado delle caratteristiche delle pavimentazioni sia all'origine, direttamente od indirettamente, dell'insicurezza dell'esercizio viario. [4] Lo stato di emergenza per una pavimentazione è connesso all'insorgenza di difetti e singolarità nella pavimentazione, in corrispondenza dei quali vengono meno i caratteri di omogeneità e regolarità del piano stradale con evidenti effetti sulla funzionalità e confortevolezza della guida e con incremento

della probabilità di incidente. Laddove tali danneggiamenti della pavimentazione non siano contrastati adeguatamente, possono arrivare ad incidere fortemente sulla gravità degli eventi incidentali. Per tali motivi è necessario condurre un'analisi razionale dei degradi, sia in relazione alle differenti tipologie, sia in relazione a cause e meccanismi di sviluppo, al fine di identificare priorità degli interventi ed idonee tecniche e tecnologie. Di conseguenza, la manutenzione di una pavimentazione stradale consiste nel programmare interventi finalizzati al recupero di prestazioni funzionali e strutturali (regolarità, aderenza, portanza, rumorosità...), in modo da garantire sicurezza, comfort, economia del trasporto ed eco-compatibilità che ne contraddistinguono lo stato in condizioni ottimali.

Per il conseguimento di ciò è necessario seguire un processo manutentivo singolo ed efficace, in grado di individuare, nel modo più preciso possibile, i seguenti parametri del problema:

- Il punto dove l'intervento è necessario (dove intervenire);
- Il tipo di intervento (come intervenire);
- Il momento più adatto per l'intervento (quando intervenire);
- Il costo dell'intervento (quanto costa intervenire).

5.4.1. Manutenzione ordinaria e straordinaria

Come anticipato nel paragrafo 5.2, la manutenzione delle pavimentazioni stradali si suddivide in manutenzione ordinaria, *maintenance*, e straordinaria, *rehabilitation*: tra queste sussiste

un'importante distinzione concettuale. Infatti, la manutenzione ordinaria include tutti quegli interventi che non modificano il progetto ordinario, e cioè interventi necessari in caso di situazioni prevedibili che richiedono il mero ripristino di condizioni normali di funzionalità di entità limitata (quali ad es. il rifacimento dello strato di usura delle pavimentazioni, l'adeguamento della segnaletica, dei sistemi di illuminazione ecc.). Pertanto il valore di vita utile di progetto della sovrastruttura sarà uguale al valore di vita utile dopo l'intervento.

La manutenzione straordinaria, invece, include tutti quegli interventi che modificano qualitativamente e/o quantitativamente il progetto originario, e cioè interventi necessari in caso di situazioni imprevedibili che non richiedono il mero ripristino di condizioni normali di funzionalità come nel caso della manutenzione ordinaria, ma di entità maggiore (quali ad es. il rafforzamento, il risanamento della pavimentazione, la sostituzione della segnaletica, del sistema di illuminazione, ecc) valutabile ad esempio mediante un valore economico di soglia per Km di strada. Di conseguenza, il valore di vita utile post intervento cambia, precisamente aumenta; evidentemente questi interventi implicano un nuovo progetto da eseguire, diverso da quello iniziale.



Fig.5.1 – Rifacimento superficiale: Stesa del conglomerato bituminoso.



Fig. 5.2 – Rifacimento superficiale: Compattazione.

Tab. 5.2 – Tecniche di intervento.

| INTERVENTO | TIPOLOGIA |
|-------------------------------------|------------------|
| Riempimento buche | Maintenance |
| Rappezzo | Maintenance |
| Bocciardatura | Maintenance |
| Pallinatura | Maintenance |
| Sigillatura delle fessure | Maintenance |
| Trattamento superficiale | Rehabilitation |
| Microtappeto | Rehabilitation |
| Splittmastix asphalt | Rehabilitation |
| Rifacimento superficiale | Rehabilitation |
| Rafforzamento | Rehabilitation |
| Rifacimento strato di usura | Rehabilitation |
| Rifacimento del rivestimento | Rehabilitation |
| Ricostruzione | Rehabilitation |
| Risanamento | Rehabilitation |

5.4.2. Manutenzione programmata

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 della sovrastruttura viaria, e dunque della manutenzione che riguarderà la medesima, tramite l'adozione di adeguati criteri di dimensionamento dei vari strati:

- *Criterio di dimensionamento fondamentale* (curva 1 – Fig. 5.3); richiede un forte investimento iniziale, tale da soddisfare i requisiti di funzionalità per tutta la vita utile di progetto; al termine di quest'ultima occorre provvedere al rinnovamento degli strati portanti, dunque al rifacimento completo della sovrastruttura stradale. Pertanto si considerano interventi di manutenzione di tipo ordinario;

- *Criterio di dimensionamento progressivo o per fasi* (curva 2 – Fig. 5.3); prevede un investimento iniziale inferiore a quello previsto per il caso precedente, ma necessita di una strategia di manutenzione diversa. Anche se i costi di costruzione sono notevolmente inferiori rispetto al caso precedente, i costi legati agli interventi manutentivi, invece, richiedono oneri finanziari, seppur differiti nel tempo, elevati;
- *Criterio di dimensionamento a manutenzione – zero* (curva 3 – Fig. 5.3); richiede un investimento iniziale di gran lunga maggiore di quello previsto nelle soluzioni precedenti. Questa soluzione non prevede interventi di manutenzione durante la vita utile della sovrastruttura, stabilita in fase progettuale.

La figura sottostante permette, graficamente, di confrontare i tre criteri, diagrammando il danno a fatica prodotto dai carichi di traffico, valutato secondo la legge di Miner, che fornisce un modo semplice per stimare la vita a fatica nel caso di sollecitazioni ad ampiezza variabile, a partire dai risultati ottenuti da prove effettuate ad ampiezza di sollecitazione o ampiezza di deformazione costanti, in funzione del tempo che intercorre dalla messa in esercizio dell'infrastruttura sino al raggiungimento della vita utile.

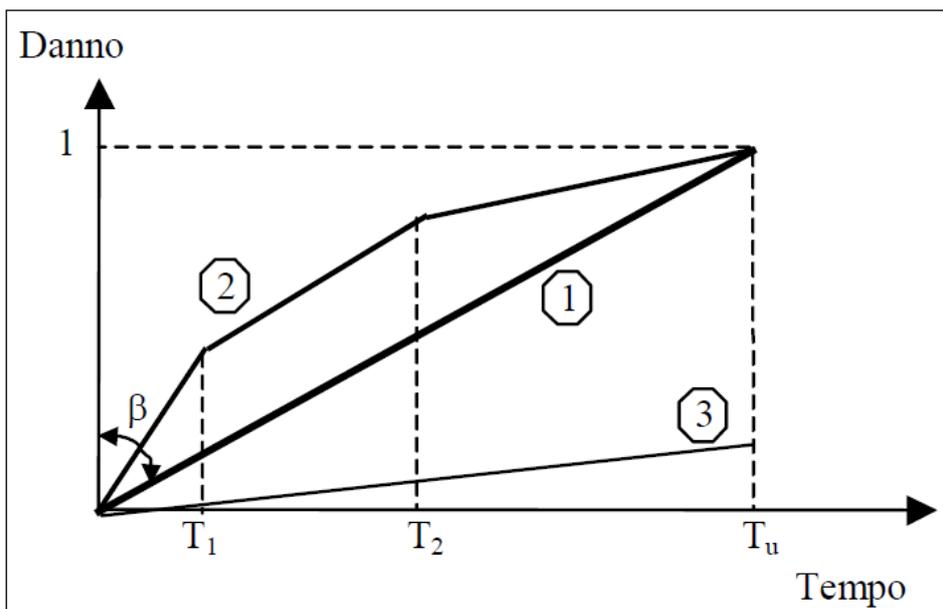


Fig. 5.3 - Criteri di dimensionamento di una pavimentazione stradale.

Si evince, che i criteri 1 e 2 prevedono che il danno cumulato alla fine della vita utile sia il massimo raggiungibile, la struttura, di conseguenza, diventa inservibile; diversamente il criterio 3 prevede un danno cumulato nettamente inferiore, proprio perché non sono previsti interventi di manutenzione poiché in fase di progettazione la vita utile della pavimentazione è considerata tendente ad infinito, quindi al termine (virtuale) della vita utile la pavimentazione è ancora utilizzabile.

I valori T_1 e T_2 individuano i momenti temporali in cui è necessario intervenire con un rinforzo della sovrastruttura; inoltre, le variazioni di pendenza che caratterizzano la curva 2 sono indicative del fatto che il danno unitario sotto un ciclo di carico, dopo il rinforzo

strutturale, è minore per la soluzione di dimensionamento progressivo rispetto a quella fondamentale. L'angolo β è proporzionale all'entità del dimensionamento iniziale della pavimentazione e quindi del suo costo di costruzione [5].

References

- [1] CNR, “*BOLLETTINO UFFICIALE Consiglio Nazionale delle Ricerche n.125/1988 - Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale*”, 1988.

- [2] S. T. Muench, J. P. Mahoney and L. M. Pierce, “*The WSDOT Pavement Guide Interactive*”, WSDOT, Olympia, WA. 2003

- [3] S. Noto, Tesi di Laurea, “Analisi di laboratorio del cracking dei conglomerati bituminosi per uso stradale: catalogo, approcci di studio ed applicazioni sperimentali con 4PB test”, Università degli Studi di Palermo, 2011.

- [4] A. Benedetto, C. Angiò, “*Diagnosi del degrado delle pavimentazioni con georadar e sicurezza stradale*”, Atti del Convegno SIIV - Parma, 2002.

- [5] B.E. Gary and G.E. Martin. “*Resurfacing with bituminoustypes of surfaces*”, Highway Research Board Proceedings, Vol. 12, pp. 177-192, 1932.

- [6] S. Canale, F. Nicosia, S. Leonardi, “*La sicurezza stradale: strategie e strumenti dell’ingegneria delle infrastrutture viarie*”, Atti del Convegno SIIV – Pisa, 1997.
- [7] Central Massachusetts Regional Planning Commission, CMRPC. “*Pavement management field to road surface distresses*”, Transportation Management System Programs, 2006.
- [8] J.J. Hajel, O.I. Selezneva, G. Mladenovic, Y.J. Jiang. “*Estimating Cumulative Traffic Loads*”, FHWA-RD-03-094, Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development, 2005.
- [9] K.T. Hall, M. Connor, M.I. Darter, S.H. Carpenter. “*Rehabilitation of concrete pavements: Concrete pavement evaluation and rehabilitation system*”, Report FHWA-RD-88-073, Vol. 3, FHWA, U.S. Department of Transportation, 1989.
- [10] J.C. Pais, J.B. Sousa, G.B. Way, R.N. Stubstad. “*An overlay design method for reflective cracking*”, Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, pp. 129-151.

- [11] R.M. Hanbali. “*Economic impact of winter road maintenance on road users*”, Transportation Research Board, pp. 151-161, 1994.

- [12] T. Fwa, W. Chan, C. Tan. ”*Genetic-Algorithm Programming of Road Maintenance and Rehabilitation*”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 122 (3), pp. 246–253, 1996.

- [13] Lu Gao, Chi Xie, Zhanmin Zhang, S. Travis Waller. “*Network-Level Road Pavement Maintenance and Rehabilitation Scheduling for Optimal Performance Improvement and Budget Utilization*”, Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 27, Issue 4, pp. 278-287, 2012.

Methodology

6.1. Introduction

Road infrastructures sustainability has been increasingly recognized as an integral part of the decision process.

In the past years the economic impact was the main taken into account factor. Nowadays, instead, environmental aspects tend to be mainly evaluated. From that the necessity to develop a system for considering both aspects, economic and environmental ones.

A merging technique has been studied in order to merge the concept of LCA and LCCA. It led to a technique that conveys both environmental and economic evaluation. When LCA and LCCA are coupled decision-makers are able to better ascertain the total impacts of a proposed project or policy [1]. Therefore, the indicators taken into account are money [€] and emissions [CO_{2e} , carbon dioxide equivalent]. The use of carbon dioxide equivalent (CO_{2e}) recognises the fact that CO_2 is not the only greenhouse gas (GHG) and provides a way to reduce all GHGs to a single value for ease of comparison. Other GHGs are converted to CO_{2e} by multiplying the mass of a given GHG by its global warming potential (GWP).

The aim of the present research is the definition of a model for evaluating road pavement sustainability. The model here proposed is called Sustainable Pavement Evaluation System, SPES. It has been

studied to compare several strategies in order to be able to choose the best one.

A case study has been studied to reach the objective.

6.2. Research approach

The present research consists of the definition of a model that allow to evaluate road pavement sustainability.

In this study there are not only environmental and economic aspects but also maintenance ones.

Two of the major failures of a road pavement are fatigue and rutting. Both of them compromise ride quality and safety. As before specified the here analyzed study takes into account just rutting behavior. Such author's choice depends on some assumptions, namely the studied road pavement are basically three and they are different among them for design life and wearing course's material. For this last reason the author has decided to consider just rutting performance like basis for maintenance strategies definition.

The research has been led by means of some softwares for each stage of the study. Specifically they are:

- *KenPave* for road pavement analysis and design [2];
- *asPECT* for environmental impact [3];

- an excel spreadsheet on the basis of LCCA manual by Federal Highway Administration [4].

The research has been structured according to its central idea, that is the development of an integrated model for evaluating the best solution among several maintenance strategies for road pavement. For this reason the structure of the research is:

- Identifying design factors;
- Road pavement design by KenPave;
- Investigating pavement behaviour according to rutting performance;
- Maintenance strategies definition;
- LCA application for each alternative design, function of design life, maintenance strategy and wearing course material;
- LCCA application for each alternative design;
- Merge LCA and LCCA technique by means of a system of rating taking into account material, GWP and costs.

The structure of the LCA model and relations between worksheets in it are designed to the features of a road project, and follow the ISO14040 norms (Table 6.1).

Tab. 6.1 - LCA model and relations between worksheets in it.

| | |
|--------------------------|---|
| Process parameters | Data on transport distance and fuel efficiency, energy consumption of unit process in a pavement project and maintenance. |
| Pavement parameters | Data on pavement dimension and material recipe, determine the materials tonnage in a pavement project. |
| Unit inventory | Inventory figures of materials production and pavement construction |
| Project inventory | Unit inventory data are aggregated into the unit of the pavement project. |
| Characterization results | Inventory results are assigned to defined impact categories, characterized by selected models and presented by category indicators. Specifically <i>Global Warming Potential</i> (GWP). |

In order to collect input data the author realized three check-lists (Figg. 6.1÷ 6.10: Materials, Plant, Construction).

| <i>Virgin Aggregates Check List</i> | | | |
|---|-----------|-----------------|-------------------|
| <i>Plant</i> | | | |
| <i>Name</i> | | <i>Address</i> | |
| <i>Plant Type</i> | | <i>Material</i> | <i>Aggregates</i> |
| <i>Total Annual Production (A)</i> | <i>mc</i> | <i>t/m3</i> | <i>tons</i> |
| <i>Extraction and Production</i> | | | |
| Electricity used (D): | | KW/h | |
| Other sources of energy (E): DIESEL | | Litres | |
| Other sources of energy (E): _____ | | | |
| Other sources of energy (E): _____ | | | |
| Other sources of energy (E): _____ | | | |
| Water used in the production (F): | | | |
| Explosive used in quarry (B): _____ | | tons | |
| Energy for overburden removal (E): _____ | | | |
| Energy for site restoration (E): _____ | | | |
| Other sources of energy to organizing the site of extraction (E): _____ | | | |

Fig. 6.1 – Virgin aggregates check-list.

| <i>Filler Check List</i> | | | |
|---|-----------|-----------------|-------------|
| <i>Plant</i> | | | |
| <i>Name</i> | | <i>Address</i> | |
| <i>Plant Type</i> | | <i>Material</i> | |
| <i>Total Annual Production (A)</i> | <i>mc</i> | <i>t/m3</i> | <i>tons</i> |
| <i>Extraction and Production</i> | | | |
| Electricity used (D): | | KW/h | |
| Other sources of energy (E): DIESEL | | Litres | |
| Other sources of energy (E): _____ | | | |
| Other sources of energy (E): _____ | | | |
| Other sources of energy (E): _____ | | | |
| Water used in the production (F): | | | |
| Explosive used in quarry (B): _____ | | tons | |
| Energy for overburden removal (E): _____ | | | |
| Energy for site restoration (E): _____ | | | |
| Other sources of energy to organizing the site of extraction (E): _____ | | | |

Fig. 6.2 – Filler check-list.

| <i>Reclaimed Asphalt Check List</i> | | | |
|--|-----------|---------------------|-------------|
| <i>Road Name</i> | | <i>Address</i> | |
| <i>Road Type</i> | | <i>Asphalt Type</i> | |
| <i>Total Reclaimed Production</i> | <i>mc</i> | <i>t/m3</i> | <i>tons</i> |
| <i>Soluble Binder Content %</i> | | | |
| <i>Milling and Production</i> | | | |
| Electricity used (D): | | KW/h | |
| Other sources of energy (E): DIESEL | | Litres | |
| Other sources of energy (E): _____ | | | |
| Other sources of energy (E): _____ | | | |
| Other sources of energy (E): _____ | | | |
| Water used in the production (F): | | | |
| Other sources of energy to organizing the site of milling (E): _____ | | | |

Fig. 6.3 – Reclaimed asphalt check-list.

| <i>Additive Check List</i> | | | |
|---|-----------|-----------------|-------------|
| <i>Plant</i> | | | |
| <i>Name</i> | | <i>Address</i> | |
| <i>Plant Type</i> | | <i>Material</i> | |
| <i>Total Annual Production (A)</i> | <i>mc</i> | <i>t/m3</i> | <i>tons</i> |
| <i>Production</i> | | | |
| Electricity used (D): | | KW/h | |
| Other sources of energy (E): DIESEL | | Litres | |
| Other sources of energy (E): _____ | | | |
| Other sources of energy (E): _____ | | | |
| Other sources of energy (E): _____ | | | |
| Water used in the production (F): | | | |
| Other sources of energy to organizing the site of extraction (E): _____ | | | |

Fig. 6.4 – Additive check-list.

Key:

- (A) Total annual production of the plant (tons);
- (B) Explosive used in quarry (tons);
- (D) Electric energy (*kWh*);
- (E) Other sources of energy (*tons, kWh, litres*):
 - Diesel
 - Oil
 - Natural gas
 - Fuel
 - Coal industry
 - Liquefied Petroleum
 - Nafta
 - Biodiesel
 - Bioethanol
 - Biomethane
 - Wood pellets
- (F) Water used for the production (liters);

| <i>PLANT Check List</i> | | | |
|---|----------------------------|---|--|
| <i>Plant</i> | | | |
| <i>Name</i> | | <i>Address</i> | |
| <i>Plant Type</i> | Batch or Continuous | | |
| <i>Total Annual Production (A)</i> | <i>mc</i> | <i>tons</i> | |
| <i>Material and Transport</i> | | | |
| Material transported to the plant (type and quantity) (G): BITUMEN | tons. | | |
| Material transported to the plant (type and quantity) (G): AGGREGATES | mc | | |
| Material transported to the plant (type and quantity) (G): ADDTIVE | kg | | |
| Material transported to the plant (type and quantity) (G): RECLAIMED ASPHALT | mc | | |
| Material transported to the plant (type and quantity) (G): FILLER | mc | | |
| Fleet to transport material BITUMEN: | (H) n° | (Vehicle type e.g. Three axles; Four axles; truck) | |
| | (I) % | (Rate of utilisation) | |
| | (J) Km | (Distance) | |
| | (K) % | (Vehicles hired) | |
| Fleet to transport material AGGREGATES: | (H) n° | | |
| | (I) % | | |
| | (J) Km | | |
| | (K) % | | |
| Fleet to transport material ADDTIVE: | (H) n° | | |
| | (I) % | | |
| | (J) Km | | |
| | (K) % | | |
| Fleet to transport material RECLAIMED ASPHALT: | (H) n° | | |
| | (I) % | | |
| | (J) Km | | |
| | (K) % | | |

| | | |
|-------------------------------------|--------|---------------------|
| Fleet to transport material FILLER: | (H) n° | |
| | (I) % | |
| | (J) Km | |
| | (K) % | |
| Utilisation rate of each vehicle | % | (Three-axle trucks) |
| | % | (Four-axle trucks) |
| | % | (Tractor) |
| | | |

Fig. 6.5 – Plant check-list.

| Production | |
|---|--------------|
| Electricity used for processing material (D) | KWh per year |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Water used in the production (F): | |
| Energy for pre-heating and drying processes (type and quantity) (E) | |
| Mix 1 "X% (Reclaimed Asphalt)" | |
| Annual production (L): | tons |
| Heating time (M): | sec |
| Production coefficient (N): | tons/h |
| Mixture components (O): | |
| Mix 2 "X%" | |
| Annual production (L): | tons |
| Heating time (M): | sec |
| Production coefficient (N): | tons/h |
| Mixture components (O): | |
| Mix 3 "X%" | |
| Annual production (L): | tons |
| Heating time (M): | sec |
| Production coefficient (N): | tons/h |
| Mixture components (O): | |
| Mix 4 "X%" | |
| Annual production (L): | tons |
| Heating time (M): | sec |
| Production coefficient (N): | tons/h |
| Mixture components (O): | |
| Mix 5 "X%" | |
| Annual production (L): | tons |
| Heating time (M): | sec |
| Production coefficient (N): | tons/h |
| Mixture components (O): | |

Fig. 6.6 – Production check-list.

| <i>Stockpile Storage</i> | |
|--|--------------|
| Electricity used for store and transport material (D) | kWh per year |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Water usage (F): | |

Fig. 6.7 – Stockpile Storage check-list.

| <i>Heating and Drying Process</i> | |
|--|--------------|
| Total electricity used for heating and drying process (D) | kWh per year |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Water usage (F): | |
| Batch | |
| Electricity used for batch process (D) | kWh per year |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Water usage (F): | |
| Fraction – Reclaimed Asphalt | |
| Electricity used for reclaimed asphalt fraction (D) | kWh per year |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Water usage (F): | |
| Fraction – Virgin Aggregates | |
| Electricity used for virgin aggregates fraction (D) | kWh per year |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Other sources of energy (E): _____ | |
| Water usage (F): | |

Fig. 6.8 – Heating and drying process check-list.

Key:

- (A) Total annual production of the plant (tons);
- (B) Discontinuous plant;
- (C) Continuous plant;
- (D) Electricity (*kWh*);
- (E) Other sources of energy (*tons, kWh, liters*):
 - Diesel
 - oil
 - Natural gas
 - Fuel
 - Coal industry
 - Liquefied Petroleum
 - Nafta
 - Biodiesel
 - Bioethanol
 - Biomethane
 - Wood pellets
- (F) Water used for the production (liters);
- (G) Materials transported to:
 - activating reagent for cohesion
 - Bitumen
 - Bituminous emulsion
 - Cement
 - Fibers

- Flux
 - Blast-furnace slag
 - Hydrated Lime
 - Bitumen modified with polymers
 - Polymer modified bitumen emulsion
 - Water
 - Others
- (H) N° vehicle used for the transport and their type;
- (I) Utilisation rate of transport vehicle(%);
- (J) Distance Traveled (km);
- (K) Vehicles hired (%);
- (L) Annual production of the mixture (tons);
- (M) Heating time (sec);
- (N) Hourly production (tons/h);
- (O) Mixture components (name and %).

| <i>Construction Check List</i> | | | |
|--|-------------------------------|--|------------------|
| <i>Road</i> | | | |
| <i>Name</i> | | <i>Address</i> | |
| <i>Road Type</i> | | <i>Designed or Evolved</i> | |
| <i>Road Size</i> | <i>Length ___m</i> | <i>Width ___m</i> | <i>Lanes ___</i> |
| <i>Material and Transport</i> | | | |
| Material transported to the plant (type and quantity) (G): (1) | | | |
| Material transported to the plant (type and quantity) (G): (2) | | | |
| Material transported to the plant (type and quantity) (G): (3) | | | |
| Material transported to the plant (type and quantity) (G): (4) | | | |
| Fleet to transport material 1: | (H) n° | (Vehicle type e.g. Three axles; Four axles; truck) | |
| | (I) % | (Rate of utilisation) | |
| | (J) Km | (Distance) | |
| | (K) % | (Vehicles hired) | |
| Fleet to transport material 2: | (H) n° | | |
| | (I) % | | |
| | (J) Km | | |
| | (K) % | | |
| Fleet to transport material 3: | (H) n° | | |
| | (I) % | | |
| | (J) Km | | |
| | (K) % | | |
| Fleet to transport material 4: | (H) n° | | |
| | (I) % | | |
| | (J) Km | | |
| | (K) % | | |
| Utilisation rate of each vehicle | (H) n° | | |
| | (I) % | | |
| | (J) Km | | |
| | (K) % | | |
| <i>Asphalt Courses</i> | | | |
| <i>Layers</i> | <i>Asphalt mixture course</i> | <i>Laying depth (cm)</i> | |
| e.g. Base | | | |

| | | |
|--|--|--|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

Fig. 6.9 – Construction check-list.

| <i>Milling</i> | | |
|--|------------------------------------|---|
| Miling depth (cm): | _____ cm | |
| Fuel consumption of milling machine (L/hour): | Diesel _____ L/hour | |
| Working capacity (m ² /hour): | _____ m ² /hour | |
| Fleet to transport milled material (road site to RAP land) | (H) n ^o | |
| | (I) % | |
| | (J) Km | |
| | (K) % | |
| Total transport amount | mc | tons |
| <i>Laying and Compacting</i> | | |
| Equipment | Fuel type and consumption (L/hour) | Working capacity (m ² /hour) |
| Eg. Pavers | | |
| Eg. Rollers | | |
| | | |
| | | |
| Total laying amount | mc | tons |
| <i>Mobilisation for Plant and Labour</i> | | |
| Equipment | Fuel type and consumption | |
| Eg. Low loaders | | |
| Eg. Crew buses | | |
| Eg. Crew cars | | |
| | | |
| | | |

Fig. 6.10 – Milling check-list.

Key:

- (A) Total annual production (tons);
- (B) Discontinuous plant;
- (C) Continuous plant;
- (D) Electricity (*kWh*);
- (E) Other sources of energy (*tons, kWh, liters*):
 - Diesel
 - oil
 - Natural gas
 - Fuel
 - Coal industry
 - Liquefied Petroleum
 - Nafta
 - Biodiesel
 - Bioethanol
 - Biomethane
 - Wood pellets
- (F) Water used for the production of asphalt (liters);
- (G) Materials transported to:

- Activating reagent for cohesion
 - Bitumen
 - Bituminous emulsion
 - Cement
 - Fibers
 - Flux
 - Blast-furnace slag
 - Hydrated Lime
 - Bitumen modified with polymers
 - Polymer modified bitumen emulsion
 - Water
 - Others
- (H) N° vehicle used for the transport and their type;
- (I) Utilisation rate of transport vehicle(%);
- (J) Distance Traveled (*km*);
- (K) Vehicles hired (%);
- (L) Annual production of the mixture (*tons*);
- (M) Heating time (*sec*);
- (N) Hourly production (*tons/h*);

(O) Mixture components (*name and %*).

6.3. Tools

In the following paragraphs the used tools are described in order to understand the basis of the procedure that led to the results.

6.3.1. KenPave

KenPave is a software for road pavement analysis and design. It consists of two computer programs:

- the KENLAYER program for flexible pavements can be applied to a multilayered system under stationary or moving multiple wheel loads with each layer being linear elastic, nonlinear elastic, or viscoelastic;
- The KENSLABS program for rigid pavements can be applied to multiple slabs fully or partially supported on a liquid, solid, or layered foundation with moment or shear transfer across joints.

Both programs can perform damage analysis by dividing a year into a number of periods, each subjected to different combinations of single and multiple-axle loads.

KENLAYER, together with input program LAYERNIP and graphic program LGRAPH, is part of a computer package called KENPAVE.

The KENLAYER computer program applies only to flexible pavement with no joints or rigid layers. The backbone of KENLAYER is the solution for an elastic multilayer system under a circular loaded area. The solutions are superimposed for multiple wheels, applied iteratively for nonlinear layers, and collocated at various times for viscoelastic layers. As a result, KENLAYER can be applied to layered systems under single, dual, dual-tandem, or dual-tridem wheels with each layer behaving differently, either elastic, nonlinear elastic, or viscoelastic. Damage analysis can be made by dividing each year into a maximum of 12 periods, each with a different set of material properties. Each period can have a maximum of 12 load groups, either single or multiple. The damage caused by fatigue cracking and permanent deformation in each period over all load groups is summed up to evaluate the design life. Each layer is characterized by the modulus of elasticity, E , and the Poisson ratio, ν .

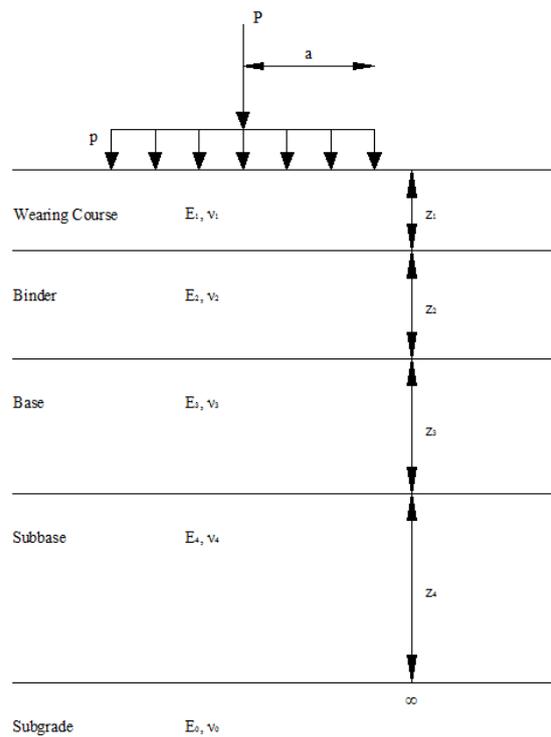


Fig. 6.11 - A layer system in cylindrical coordinates [1].

6.3.2. asPECT

In 2009 TRL, in collaboration with the Highways Agency, Minerals Products Association and Refined Bitumen Association published the first part of the *asphalt Pavement Embodied Carbon Tool* (asPECT) [5, 6].

The full stand-alone programme - whole life - version of the tool was released in 2011 [7]. This UK based tool has been developed to produce PAS 2050 compliant carbon footprints. The life cycle stages

covered in the model are: *materials*; *transport*; *construction*; *maintenance*; and *end-of-life*. asPECT uses a process based approach as advocated by PAS 2050 and so suffers from truncation errors and data issues; such as the lack of accurate embodied carbon data for many construction materials. It is intended to cover all asphalt pavement laying. It is highly adaptable due to this large scope but it can struggle to meet the needs of very specific users. To date, there is little evidence of its use.

The general methodology applied for the GWP assessment of road surface treatments is the PAS 2050 methodology, using the assumptions made in the asPECT protocol.

The *asPECT* software accompanies the protocol for calculating the life cycle greenhouse gases in asphalt. The software tool is designed to provide a framework which contains the necessary formulae, emissions factors and default data to calculate the ‘cradle-to-grave’ GHG emissions of asphalt products in accordance with the protocol clauses, covering the 10 steps of the asphalt life cycle indicated in Figure 6.12. It is designed primarily to be used by asphalt producers and contractors who have access to the detailed information that it requires to operate. The information generated by the software is then passed onto client organizations in the pre-defined output formats which are built into the program.

| Life-cycle stage | | Description |
|------------------|-------------------------------------|---|
| 1 | Raw Material Acquisition | Acquiring raw materials from the natural environment with the input of energy |
| 2 | Raw Material Transport | Transporting acquired raw materials to processing |
| 3 | Raw Material Processing | Crude oil refining, rock crushing and grading, recycled and secondary material reprocessing |
| 4 | Processed Material Transport | Transporting processed raw materials to site of manufacture of bitumen bound highway components |
| 5 | Road Component Production | Production of bitumen bound mixtures |
| 6 | Material Transport to Site | Delivery of materials to site |
| 7 | Installation | Placing materials at the construction site, mobilisation of plant and labour |
| 8 | Scheme Specific Works | Installation of other specified materials direct to site (e.g. aggregates and geosystems) |
| 9 | Maintenance | Interventions to maintain the road: overlay, surface dressing works, patching, haunching etc. |
| 10 | End of Life | Excavation and material management, mobilisation of plant and labour |

Fig. 6.12 – Steps of the asphalt life cycle [3].

In 2013, a review of asPECT was commissioned. Part of the remit of this review was to update the software tool, with the following two objectives [3]:

- a. To add additional functionality to the asPECT software, in order to facilitate the use of non-UK specific emissions factors for international users, and those requiring a more customisable

approach with regards to recycling-recyclability allocation and consideration of residual binder activity.

- b. To update specific emissions factors for materials, fuels and transport in the software tool, where new and appropriate data sources have become available.

These two objectives have been met in producing the asPECT Software Tool version 3.1.

The tool centres around the following main elements:

- Main Screen;
- Materials Screen;
- Plants Screen;
- Project Screen.

All functions can be accessed through these main elements.

Also included are six categories of data:

- Material;
- Energy Consumption;
- Transport;
- Mixtures;
- Maintenance;
- End of Life.

The Main Screen is the primary element of the tool from which all other elements are accessed. It consists of a menu bar, toolbar, workspace and a status bar.

The toolbar contains 4 buttons from which it is possible to open the windows to build the case study of interest. Such windows are Materials, Plants, Projects and Constants.

The Materials button opens the Materials main screen and provides an access point to create new and edit existing materials.

The Plants button opens the Plants main screen which displays details of all the plants entered into the tool. From here you have access to create new plants and edit existing ones.

The Projects button opens the Projects main screen which displays details of all saved projects in the software. From here you have access to create new projects and edit existing ones.

The Constants button opens a number of editable forms when using the software's "open access" mode. From here you can specify your own constants for use in relation to a particular asPECT file.

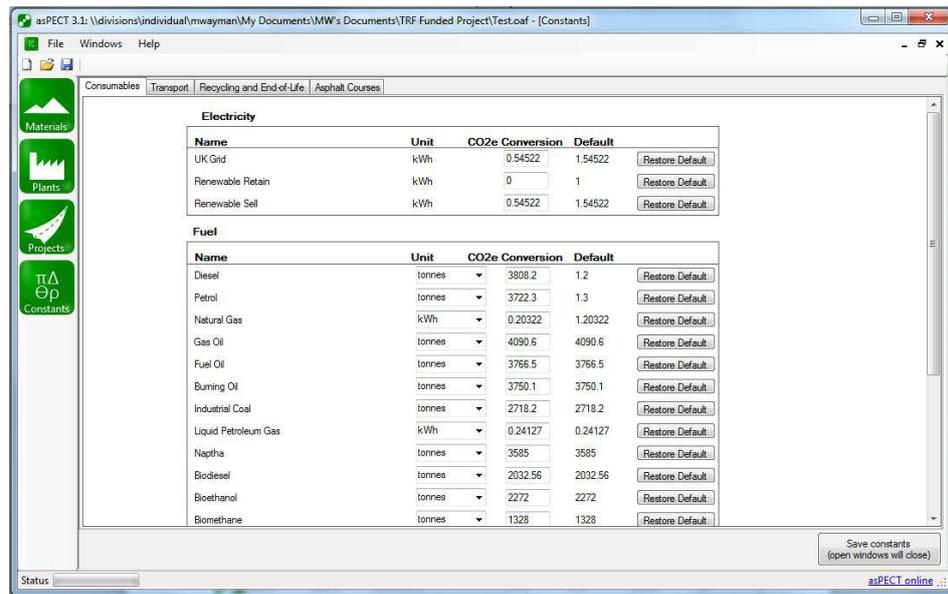


Fig. 6.13 – Constants window.

In order to make the most accurate estimations of road transport emissions the asPECT software has been built to include the utilisation factors of vehicles in the calculations.

This approach calculates the emissions for the whole journey and for the whole load carried. It is then necessary to attribute the emissions per tonn of the material/mixture conveyed. For each category of road haulage vehicle a “maximum payload” is used to apportion emissions per tonn. For each journey, the emissions will be reported in kgCO₂e/t. The maximum payload for the chosen category, Articulated > 33 tonn, is 30 tonn.

6.3.3. Excel spreadsheet for costs

Excel spreadsheet for evaluating economic impact is based on LCCA manual, in which it is possible to find the procedure to calculate initial and discounted future agency, user, and other relevant costs over the life of alternative investments.

| AADT | | 34081 | | Resurfacing 2020 | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|----------|---------------|------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------|--|
| (24 - Hr Check) | Request | Capacity | Queue portion | Queue | Pass through the diversion | Pass through the queue | From SS113 Pass through the queue | From A19 Pass through the queue | Stop 90 - 0 - 90 [Km/h] | Slow down 90 - 37 - 90 [Km/h] | Stop 130 - 0 - 130 [Km/h] | Slow down 130 - 37 - 130 [Km/h] | |
| (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) | (g) | (h) | (i) | (j) | (k) | (l) | (m) | |
| 12-01 | 441 | 1700 | -1259 | 0 | 438 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 438 | |
| 01-02 | 365 | 1700 | -1395 | 0 | 303 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 303 | |
| 02-03 | 271 | 1700 | -1429 | 0 | 269 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 269 | |
| 03-04 | 271 | 1700 | -1429 | 0 | 269 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 269 | |
| 04-05 | 374 | 1700 | -1328 | 0 | 370 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 370 | |
| 05-06 | 717 | 1700 | -983 | 0 | 707 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 707 | |
| 06-07 | 1603 | 1700 | -97 | 0 | 1582 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 1582 | |
| 07-08 | 2180 | 1469 | 711 | 711 | 2154 | 1469 | 17 | 1452 | 26 | 0 | 2154 | 0 | |
| 08-09 | 1908 | 1469 | 439 | 1151 | 1885 | 1469 | 18 | 1451 | 23 | 0 | 1885 | 0 | |
| 09-10 | 1739 | 1469 | 270 | 1420 | 1717 | 1469 | 19 | 1450 | 22 | 0 | 1717 | 0 | |
| 10-11 | 1773 | 1469 | 304 | 1725 | 1751 | 1469 | 19 | 1450 | 23 | 0 | 1751 | 0 | |
| 11-12 | 1841 | 1469 | 372 | 2097 | 1812 | 1469 | 19 | 1450 | 24 | 0 | 1812 | 0 | |
| 12-13 | 1875 | 1469 | 406 | 2503 | 1852 | 1469 | 19 | 1450 | 25 | 0 | 1852 | 0 | |
| 13-14 | 1876 | 1469 | 407 | 2910 | 1852 | 1469 | 19 | 1450 | 28 | 0 | 2053 | 0 | |
| 14-15 | 2081 | 1469 | 612 | 3522 | 2053 | 1469 | 19 | 1450 | 32 | 0 | 2457 | 0 | |
| 15-16 | 2490 | 1469 | 1021 | 4543 | 2457 | 1469 | 19 | 1450 | 33 | 0 | 2626 | 0 | |
| 16-17 | 2659 | 1469 | 1190 | 5733 | 2626 | 1469 | 18 | 1451 | 31 | 0 | 2424 | 0 | |
| 17-18 | 2435 | 1469 | 986 | 6719 | 2424 | 1469 | 18 | 1451 | 23 | 0 | 1818 | 0 | |
| 18-19 | 1841 | 1469 | 372 | 7091 | 1818 | 1469 | 18 | 1451 | 18 | 0 | 1448 | 0 | |
| 19-20 | 1465 | 1469 | -4 | 7087 | 1448 | 1469 | 18 | 1451 | 15 | 0 | 1246 | 0 | |
| 20-21 | 1261 | 1469 | -208 | 6879 | 1246 | 1469 | 17 | 1452 | 13 | 0 | 1077 | 0 | |
| 21-22 | 1090 | 1469 | -379 | 6499 | 1077 | 1469 | 16 | 1453 | 10 | 0 | 875 | 0 | |
| 22-23 | 885 | 1469 | -584 | 5915 | 875 | 1469 | 16 | 1453 | 6 | 0 | 673 | 0 | |
| 23-24 | 680 | 1469 | -789 | 5126 | 673 | 1469 | 14 | 1455 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Totale | 34081 | | | | 33664 | 34073 | 305 | 24668 | 374 | 44 | 29725 | 3030 | |

Fig. 6.14 – Extract from excel spreadsheet from “Traffic quota” for DL 10 years.

| Resurfacing 2020 | | | | | | | | |
|----------------------------|------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------|------|
| Pass through the diversion | Pass through the queue | From SS113 Pass through the queue | From A19 Pass through the queue | Stop 90 - 0 - 90 [Km/h] | Slow down 90 - 37 - 90 [Km/h] | Stop 130 - 0 - 130 [Km/h] | Slow down 130 - 37 - 130 [Km/h] | |
| (f) | (g) | (h) | (i) | (j) | (k) | (l) | (m) | (n) |
| 438 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 438 |
| 303 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 303 |
| 269 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 269 |
| 269 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 269 |
| 370 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 370 |
| 707 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 707 |
| 1582 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 1582 |
| 2154 | 1469 | 17 | 1452 | 26 | 0 | 2154 | 0 | 0 |
| 1885 | 1469 | 18 | 1451 | 23 | 0 | 1885 | 0 | 0 |
| 1717 | 1469 | 19 | 1450 | 22 | 0 | 1717 | 0 | 0 |
| 1751 | 1469 | 19 | 1450 | 23 | 0 | 1751 | 0 | 0 |

Fig. 6.15 – Particular of Fig. 6.14.

6.4. Merging technique

Tools before mentioned are useful to deal with separately the environmental and economic aspects. Results obtained from them have been incorporated in SPES, *Sustainable Pavement Evaluation System*, and arranged according to a normalization system. SPES has been conceived to compare several strategies in order to allow to the specialised engineer to take his choice.

SPES provides a rank based on the normalization of every strategy's environmental and economic value relative to the worst strategy. SPES is structured like shown in the following scheme.

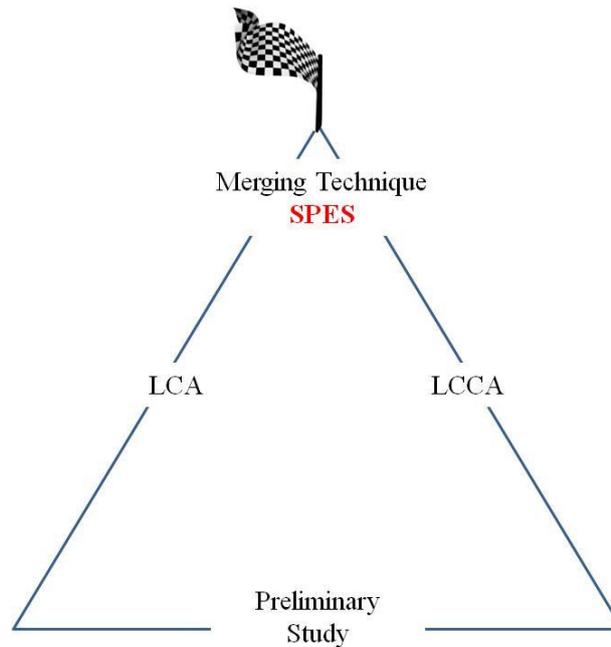


Fig. 6.16 - SPES structure.

By means of asPECT each strategy is environmentally evaluated and characterized by a CO₂ value typical for the entire strategy. The author changed some constants in the Constant window in order to be closer to the Italian case. Infact tool's default constants are calculated according to British experience.

Excel spreadsheet provides an economic value in terms of Net Present Value, NPV, for each strategy.

The values have to be so interpreted:

- the lowest value means best alternative;
- the highest value the worst one.

In SPES the *SPES number*, S_n , assigned to each strategy, is so computed:

$$S_n = e_n + c_n + r_n$$

Where:

$$e_n = \frac{E_n}{E_w} \quad c_n = \frac{C_n}{C_w} \quad r = 1 - \frac{\%RAP}{100}$$

e_n = environmental ratio for the n-strategy;

c_n = economic value for the n-strategy;

r_n = material value

E_w = environmental value for the worst strategy;

C_w = economic value for the worst strategy.

So, the minimum S_n identifies the best strategy.

References

- [1] N.J. Santero, E. Masanet, A. Horvath. “*Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review*”, Resources, Conservation and Recycling journal, n.55, 801-809, 2011

- [2] Y.H. Huang, “*Pavement Analysis and Design*”, Pearson Prentice Hall, 2012.

- [3] Transport Research Laboratory, TRL, asPECT Software Tool, 2014.

- [4] Federal Highway Administration, FHWA, “*Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design – In Search of Better Investment Decisions*”, Pavement Division Interim Technical Bulletin, 1998.

- [5] B. Cordell and M. Wayman, “AsPECT calculator user guide. Technical report”, TRL, www.sustainabilityofhighways.org.uk/, 2009.

- [6] M. Wayman, I. Schiavi-Mellor and B. Cordell, “*Futher guidance to accompany the protocol for the calculation of life cycle greenhouse*

gas emissions generated by asphalt used in highways. Technical report", TRL, www.sustainabilityofhighways.org.uk, 2009.

- [7] M. Wayman, I. Schiavi-Mellor and B. Cordell, "*Further guidance on the calculation of whole life cycle greenhouse gas emissions generated by asphalt. Technical report*", TRL, www.sustainabilityofhighways.org.uk, 2011.

Case study

7.1. Introduction

In this chapter the here studied merging technique called SPES will be presented within a case study consisting essentially of road pavement management cases.

As before disclosed in the Introduction (Chapter 1) road maintenance is based on the necessity for Road Authorities to ensure safety for the users. The main damages that lead to safety problems are linked to fatigue and rutting performances, remembering skid resistance as well. Every damage should be treated through the identification of the causes of the damage and engineering a solution.

There are many assumptions and methodological decision required to be made to conduct a complete evaluation on a whole life.

Even though the ISO standards and PAS20150 offer generic advice on many of these issues, there is no specific guidance in the road pavement field for environmental assessment. Instead, FHWA's LCCA manual is built on road pavement. So, the treatise here presented needs to early clarify the assumptions of such study. They will be disclosed in the following sections.

7.2. Objectives

The study aims to investigate the interaction between environmental and economic evaluation through the definition of a merging technique. The main objectives are:

1. Quantifying the whole life GWP in terms of CO_{2e} and costs for each strategy;
2. Merging the obtained values;
3. Comparing results.

The first objective can be reached by means of a quantitative analysis of each strategy. Such quantitative analysis is conducted by means of tools presented in Chapter 6 (Paragraph 6.3). A study of the road pavement and its behaviour in terms of rutting performance is preliminary to it, because it allows to define the maintenance strategies that have to be evaluated.

The second objective will consist of an analysis conducted by means of SPES (Paragraph 6.4.).

The third objective is a mere results analysis. It will highlight the best strategy in terms of both environmental and economic aspects. The results will provide a scheme for future investigation that allows to take into account all aspects, namely design, constructive and maintenance ones according to environmental and economic limits.

7.3. Case study's frame (description)

The merging technique has been applied in order to select the best strategy for road pavement in the EXTRAURBANA area close to Palermo. The case study is based on the interventions on the road pavement of a 2-km-long section on A19 motorway, named Palermo-Catania freeway as well. Such motorway is classified like road of category A according to Italian Road Classification [1] and it has the following geometry:

- Lane width = 3,75 m;
- Shoulder width = 2,50 m;
- Carriageway width = 10 m.

It consists of separated carriageways for each direction.

Basically, eight alternatives are considered and founded on four different design life, namely 10, 20, 30 and 40 years (DL10, DL20, DL30, DL40). The alternatives have been studied to reach 50-years analysis period starting from year 2013. So, it represents year 0 (zero). The maintenance strategies have been studied according to wearing course's rutting performance. Wearing course have been made of virgin materials and recycled ones. They respectively contain 0, 30 and 50 percentage of RAP (0HRMA, 30HRMA, 50HRMA).

So, each alternative is characterized by a design life and a percentage of RAP in the wearing course, because depending on them the maintenance strategy changes. Henceforth the alternatives will be called

DL10-0HRMA, that is the alternative with design life of 10 years and 0 percentage of RAP in the wearing course.



Fig. 7.1 – A19 Freeway.



Fig. 7.2 – SS113 Highway.

The section starts at km 6+00 and it ends at km 8+00 (Fig. 7.3).



Fig. 7.3 – Section.



Fig. 7.4 – Diversion and work-zone.

Such roadworks require a diversion because of the section is placed in correspondence to the Bagheria junction. So it is necessary a diversion on SS113 highway (Fig. 7.2) starting at km 4+00 (Villabate

junction) until to the following junction for entering the freeway again (Casteldaccia junction, km 9+00). Such diversion on SS113 has a length equal to 15 km. SS113 is classified like road of category C2 according to Italian Road Classification [1] and it has the following geometry:

- Lane width = 3,50 m;
- Shoulder width = 1,25 m;
- Carriageway width = 9,50 m.

It consists of one lane for each direction and only one carriageway.

So, the work-zone, namely the section closed for the interventions, correspond to the section from km 6+00 to km 9+00.

The background information of the case study is: the road pavement is at the end of the service life; hystoric traffic series (1991÷2012) and temperatures one (1965÷1994) were used to design the pavement by means of kenPAVE (Paragraph 6.3.1.) software; the knowledge about equipments and activities' durations comes from investigations and course lecture note [2].

On the basis of the available data on the existing pavement the superstructure consists of an old traditional pavement 45 cm-thick (25 cm binder layers, 20 cm subbase).

Within the case study in addition to the site of intervention (2-km section on A19 freeway) other places have been located. Such places are relative to the phases of the alternative strategies, in other words they are places of interest for the asphalt production, materials extraction, landfill

for material waste removal. So, they are underlined in Fig. 7.5 and in Table 7.1 distances between places are reported.



Fig. 7.5 – Places of interest.

Tab. 7.1 – Transportation distances.

| Material | From | To | Distance [km] |
|----------------------------|-------------|-----------|----------------------|
| Aggregates | Quarry | Plant | 46 |
| Binder | Refinery | Plant | 215 |
| RAP | RAP Plant | Plant | 110 |
| Bituminous Mixtures | Plant | Site | 83 |
| RAP | Site | Stockpile | 32 |
| Unbound material (subbase) | Quarry | Site | 121 |
| Unbound material (subbase) | Site | Stockpile | 32 |

Tab. 7.2 – Places of interest.

| Place of interest | Name | Location |
|--------------------------|--------------------|-------------------------|
| Quarry | SO.GE.CAB. | Torrenova (ME) |
| Refinery | Ferrara Accardi | Catania |
| RAP Plant | Plant | S. Ciro di Marineo (PA) |
| Plant | Euroasfalti s.r.l. | Reitano (ME) |

Site - A19 PA-CT km 6+00 Bagheria (PA)
Stockpile CLG Costruzioni Area Industriale Terimini Imerese (PA)

7.4. Methodology

The followed approach in such case study is summarized in the scheme in Figure 7.6.

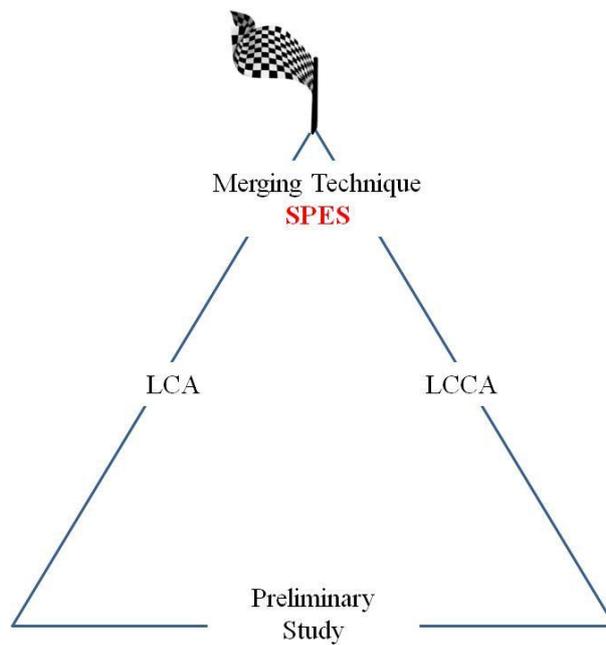


Fig. 7.6 - SPES structure.

The first level is in readiness for the consecutive steps. It allows to frame the issue, in particular it consists of:

- Site identification;

- Choice of materials to be used in pavement's layers;
- Pavement design;
- Pavement performances;
- Maintenance plans definition.

Following steps in the second level depend on the first one and are independent among them. Therefore the study goes on with the economic and environmental analysis. Finally it converges to the merging technique.

As regards the case study the author, as declared in Paragraph 7.2., first of all designed the pavement for the section that is the subject matter of the research. After, known rutting behaviour (Paragraph 7.4.1.), maintenance plans have been studied.

Specific interventions in the maintenance plans are:

- a) Full Depth Repair (FDR);
- b) Resurfacing (just wearing course);
- c) Reconstruction (all binder layers).

Where:

a) is the same intervention's kind for each strategy at the starting year, 0;

b) and c) for the year of intervention according to pavement behaviour.

The interventions' selection is strictly up to the damage on the pavement.

Since Full Depth Repair can be assimilated to a new pavement construction (Paragraph 7.4.7.) it needs a design in order to know layers' thickness according to design factors, namely traffic load, temperatures and subgrade typology relative to the chosen site.

Pavement design has been carried out taking into account four design life values, respectively 10, 20, 30 and 40 years, and, an analysis period equal to 50 years has been considered in order to be able to compare all strategies among them.

Pavement design has been carried out by means of KenPave (Paragraph 6.3.1.). Finally maintenance plans have been defined and later the author ran the environmental and economic analysis, as beforehand disclosed.

7.4.1. Assumptions

Within the case study it has been needed to introduce some assumptions linked to each field of interest, namely design factors, materials, maintenance and rehabilitation strategies, Life Cycle Assessment, Life Cycle Cost Analysis.

You can observe in detail such assumptions:

Design factors

- Site intervention: 2 km-section on A19 Motorway, starting from km 6+00 Bagheria;

- Traffic historic series: from 1991 to 2012;
- Temperature historic series: from 1965 to 1994.

Materials

- Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) used for wearing course. Wearing course with 0-30-50 percentage of RAP;
- Traditional Hot Mix Asphalt (HMA) for binder and base layers;
- Stiffness modulus obtained by Asphalt Institute formula;
- Pavement layers:
 - Wearing course 4 cm
 - Binder 6 cm
 - Base 18 ÷ 28 cm (it depends on the design life and on the traffic load in the year of construction)
 - Subbase 25 cm (it depends on the design life and on the traffic load in the year of construction)
- Design life: 10 – 20 – 30 – 40 years. 10 years-design life has been chosen even if it's not really realized in the practice in order to have a complete comparison among the alternatives.
- Analysis period: 50 years.

Maintenance and rehabilitation strategies

- Based on International roughness Index (IRI) and Rut Depth (RD) [f(SN)];

- Interventions: Full Depth Repair (only for year 0), Resurfacing, Reconstruction (*“Catalogo degli interventi di manutenzione sulle pavimentazioni stradali - Sintesi inerente lo stato della manutenzione stradale in ambito internazionale, in Italia ed in Regione Lombardia”* Allegato C. Direzione Generale Infrastrutture e Mobilità – Regione Lombardia)
- Equipment machineries

Tab. 7.3 – Equipments.

Equipments

| Operation | Layer | Vehicle | Note |
|----------------------|---------------|------------------|--|
| Milling | Asphalt Layer | Milling machine | Wirtgen - Cold Milling Machine W210 |
| Excavation | Subbase | Excavator | Hitachi - ZX140 W-3 |
| Stabilisation | Subgrade | Drum roller | Bomag - Variocontrol Single Drum Vibratory Rollers BW 332 Deep Imp. |
| Laying | Subbase | Excavator | Hitachi - ZX140 W-3 |
| Compaction | Subbase | Drum roller | Bomag - Variocontrol Single Drum Vibratory Rollers BW 332 Deep Imp. |
| Laying | Asphalt Layer | Paver | Bomag - BF800C - Tier 4i |
| Compaction | Asphalt Layer | Steered roller | CAT - CD54B - Split Drum |
| Laying | Tack Coat | Emulsion Sprayer | - |

Life Cycle Assessment (LCA)

- Materials window: “Create from production energy”
 - asPECT value for bitumen
 - Average value from Euroasfalti s.r.l. real data for aggregates and RAP
- Plant window:
 - Mixtures production and transport to plant of aggregates, RAP and bitumen

- Energy value from average value from Euroasfalti s.r.l. real data
 - Transport: Autoarticulated 33 tonns, max payload 30 tonn
 - Transported materials equal to 1.3 needed materials in order to take into account losses due to the loading and unloading and for laying and compaction
 - Location of place of interest: Plant, Quarry, Intervention Site, Disposal
- Interventions' duration:
- Hypotesis dismantling existing pavement: binder layers 25 cm and subbase 20 cm
 - Bond coat: working on half carriageway
 - Laying and compacting: 2 steered roller. Total width=3m; overlapping=1m. 5m at a time (half carriageway at a time)
- The total emission for each intervention takes into account the emissions coming from dismantling previous pavement and transport to disposal;
- Queue emission:
- Vehicle fleet Palermo
 - Fuel vehicle fleet Italy.

Life Cycle Cost Analysis (LCCA)

- Road geometry:
- Lane width 3.75 m

- Shoulder width 2.50 m
 - Carriageway width 10 m
 - 2 km-section 2000m
 - Surface 20000 sqm
- Interventions' costs from an investigation realized in range of a thesis;
 - Taking into account an highway for traffic deviation (SS119);
 - 15 km-diversion;
 - 5 km work-zone;
 - Discount rate and inflation historic series to discount costs from *TUS (Ex Italian Official Discount Rate – Ex Tasso Ufficiale di Sconto)* of Bank of Italy.

7.4.2. Pavement design and design factors

The design factors, in other words the most significant elements for the purpose of the design of a flexible pavement, are:

- *Traffic load;*
- *Subgrade typology;*
- *Mechanic properties of materials of which are made of layers;*
- *Temperatures.*

So, the design factors have been found (traffic load and temperatures) and determined (mechanic properties of materials and subgrade bearing capacity).

7.4.3. Traffic

The historic series that the author has provides the heavy vehicles average annual daily traffic, $AADT_{HV}$. It has been measured in corresponsce to the section at km 6+00 on A19 freeway and carried out by Azienda Nazionale Autonoma delle Strade ANAS s.p.a..

Tab. 7.4 - ANAS traffic data at km 6.00 Bagheria on A19 Freeway.

| Year | AADT |
|-------------|-------------|
| 1991 | 23913 |
| 1992 | 25114 |
| 1993 | 22831 |
| 1994 | 27500 |
| 1995 | 24640 |
| 1996 | 22433 |
| 1997 | 27458 |
| 1998 | 28446 |
| 1999 | 33438 |
| 2000 | 36464 |
| 2001 | 32084 |
| 2010 | 35053 |
| 2012 | 33486 |

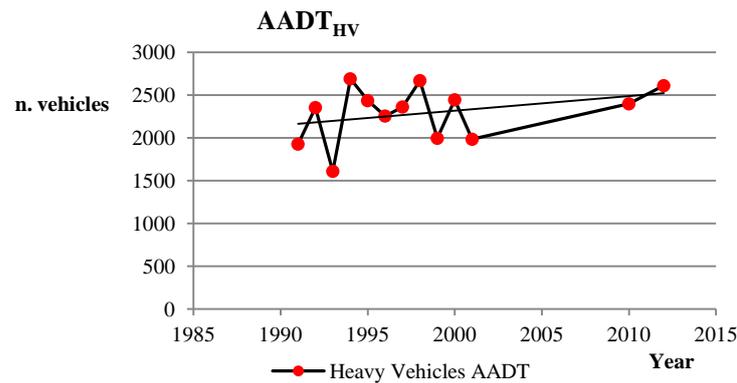


Fig. 7.7 - AADT at km 6.00 on A19 Freeway dir. PA-CT.

Such historic series is used to determine heavy vehicles traffic, T_{HV} , at the starting year of the freeway section's use through a linear interpolation using an average growth rate, r , equal to 1,8% for light vehicles and to 0,5% for heavy vehicles.

7.4.4. Subgrade

The geological informations were gathered from geologic chart n.250 (scale 1:50000) of Italy, realized by Servizio Geologico d'Italia e tratta da ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale).

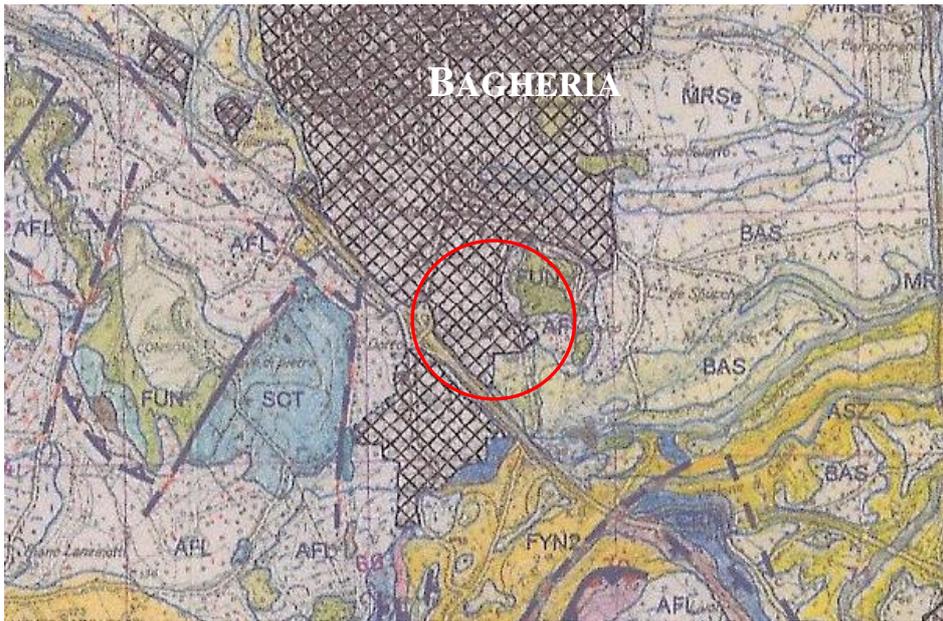


Fig. 7.8 - Extract of geologic chart n. 250 of Italy - Scale 1:50000.

Therefore, the subgrade is made of sandy clay loam. So, it is possible to take on an elastic modulus typical of such material, E_0 , equal to 130000 kPa.

7.4.5. Mechanic properties of materials

Mechanic properties of interest are stiffness modulus, $|E^*|$, and Poisson ratio, ν , for each layer of the designed pavements. Poisson ratio varies according to the nature of materials: for bituminous mixtures it takes on a value equal to 0,3; for unbound granular mix, subbase and subgrade, it takes on values respectively equal to 0,35 and 0,4.

For determining stiffness modulus it resorted to the use of Asphalt Institute formula [3]. The stiffness modulus depends on the bituminous mixtures properties, in particular on the granulometric and volumetric characteristics, consistency of used binder that, as is known, is function of in operation temperatures, and finally the modulus depends on the stress frequency. The frequency, f , is measured in Hertz [Hz] and viscosity, v , in millions of poise [10^6 poise]. Viscosity is influenced by temperature according to the experience to an exponential law. To calculate frequency value it uses the Klomp formula.

$$f = 0,4 \times V$$

where f is expressed in Hz and V , speed, in km.

Volumetric characteristics, useful to determine, are percentage of air voids, V_a (air voids), relative to the total volume filled by mixture, and percentage of voids effectively filled by binder, V_{beff} (effective binder content). Effective binder content is the binder quantity excluding absorbed binder by the aggregates' surface. So, it fills inter-granular spaces and it influences adhesive properties.

Granulometric parameters are:

- ρ_{200} = percentage passing #200 ASTM (0,075 mm) sieve by total aggregate weight;
- ρ_4 = percentage retained om #4 ASTM (4,75 mm) sieve by total aggregate weight;
- $\rho_{3/8}$ = percentage retained on 3/8-in ASTM sieve by total aggregate weight;

- $p_{3/4}$ = percentage retained on 3/4-in ASTM sieve by total aggregate weight.

Furthermore, the subbase's elastic modulus has been calculated by Dormon & Klomp formula. Such value depends on stresses imparted by upper layers, on side confining stresses and on subgrade reaction.

$$E_{subb} = 0,206 \times S^{0,45} \times E_0$$

7.4.6. Weather conditions

Meteorologic data are provided from SIAS (Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano implemented and coordinated by Assessorato Regionale Agricoltura and Foreste) that manages all data from thermopluviometer stations.

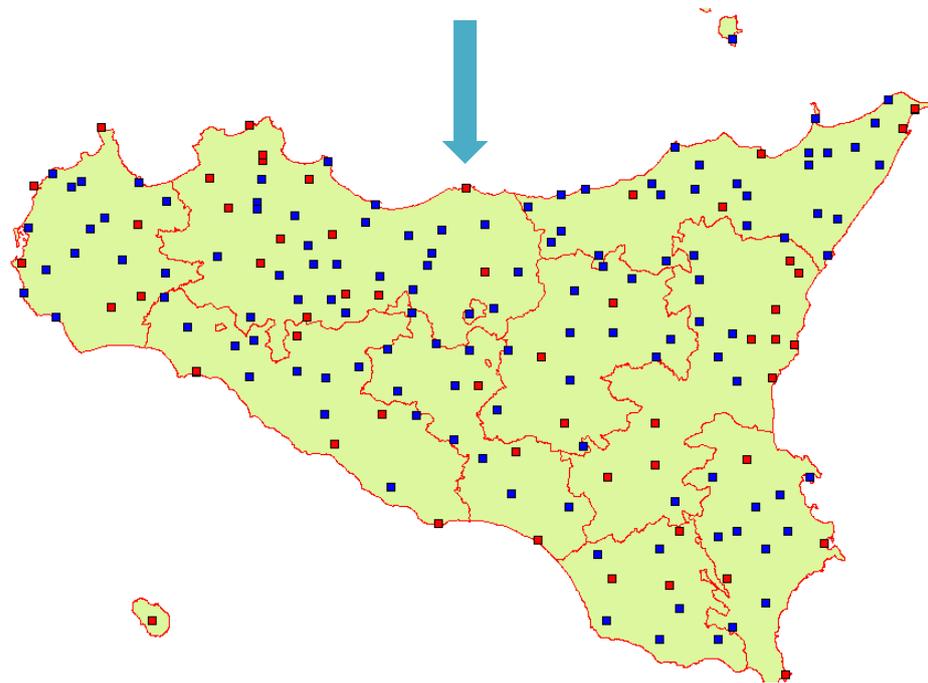


Fig. 7.9 – Termopluviometer stations in Sicily.

The station chosen for the site matter of such research is placed in Palermo, because it represents more than the others the area in which the site stands on from the plan-altimetric point of you. Such data are calculated in order to obtain air temperature, T_{air} , needed for the investigation of the temperatures' trend inner the pavement, according to Marchionna's formula.

On the basis of data provided from SIAS it has available the temperatures' historic series relative to the site of interest and it consists of 30 years (1965 ÷ 1994) of recorded data.

From meteorologic data it extrapolates maximum and minimum temperatures of each month recorded in each year of series.

$$\bar{T}_{\max(j)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_{\max(j)} \quad \bar{T}_{\min(j)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_{\min(j)}$$

where n is the number of the years of observation and j is the generic month.

Tab. 7.5 - Maximum and minimum temperatures of each month recorded in each year of series.

| Station: Palermo | | |
|-------------------------|---|--|
| Months | T_{average (MAX)} [°C] | T_{average(MIN)} [°C] |
| January | 21.0 | 4.7 |
| February | 22.7 | 4.4 |
| March | 25.1 | 5.5 |
| April | 28.1 | 7.8 |
| May | 32.9 | 11.0 |
| June | 35.9 | 14.3 |
| July | 38.2 | 18.0 |
| August | 38.3 | 18.7 |
| September | 35.3 | 15.7 |
| October | 31.2 | 12.0 |
| November | 26.3 | 8.5 |
| December | 21.6 | 5.7 |

After it identifies four seasonal periods characterized by a maximum and minimum temperature. Then it goes ahead calculating average temperature, both maximum and minimum, for each period.

$$\begin{aligned}\bar{T}_{\max,1} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \bar{T}_{\max(j)} & \bar{T}_{\min,1} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \bar{T}_{\min(j)} \\ \bar{T}_{\max,2} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \bar{T}_{\max(j)} & \bar{T}_{\min,2} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \bar{T}_{\min(j)} \\ \bar{T}_{\max,3} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \bar{T}_{\max(j)} & \bar{T}_{\min,3} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \bar{T}_{\min(j)} \\ \bar{T}_{\max,4} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \bar{T}_{\max(j)} & \bar{T}_{\min,4} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \bar{T}_{\min(j)}\end{aligned}$$

Such temperature are showed in Table 7.6.

Tab. 7.6 – Average monthly temperature.

| Period | T_{average (MAX)} [°C] | T_{average(MIN)} [°C] |
|---------------|---|--|
| <i>Winter</i> | 22.9 | 4.9 |
| <i>Spring</i> | 32.3 | 11.0 |
| <i>Summer</i> | 37.3 | 17.5 |
| <i>Autumn</i> | 26.4 | 8.7 |

Finally it calculates average air temperature for each period:

$$\bar{T}_{air,1} = \frac{(\bar{T}_{max,1} + \bar{T}_{min,1})}{2} \quad \bar{T}_{air,2} = \frac{(\bar{T}_{max,2} + \bar{T}_{min,2})}{2}$$

$$\bar{T}_{air,3} = \frac{(\bar{T}_{max,3} + \bar{T}_{min,3})}{2} \quad \bar{T}_{air,4} = \frac{(\bar{T}_{max,4} + \bar{T}_{min,4})}{2}$$

Tab. 7.7 – Average air temperature.

| Period | T _{average, air} [°C] |
|--------|--------------------------------|
| Winter | 13.9 |
| Spring | 21.6 |
| Summer | 27.4 |
| Autumn | 17.5 |

Then, it applies Marchionna's formula in typical points inner pavements, specifically at 2/3 of each layer's thickness.

$$T_{pav}(z) = (1,467 + 0,043z) + (1,362 - 0,05z) \times T_{air}$$

and

$$z_{w.c.} = \frac{2}{3} \cdot t_{w.c.}$$

$$z_{bin} = t_{w.c.} + \frac{2}{3} \cdot t_{bin}$$

$$z_{bas} = t_{w.c.} + t_{bin} + \frac{2}{3} \cdot t_{bas}$$

where:

- $t_{w.c.}$ is wearing course thickness [cm];
- t_{bin} is binder thickness [cm];

– t_{bas} is base thickness.

in cui s è lo spessore degli strati di usura (U), collegamento (C) e base (B).

In the following chart you can observe the temperature trend inner pavement.

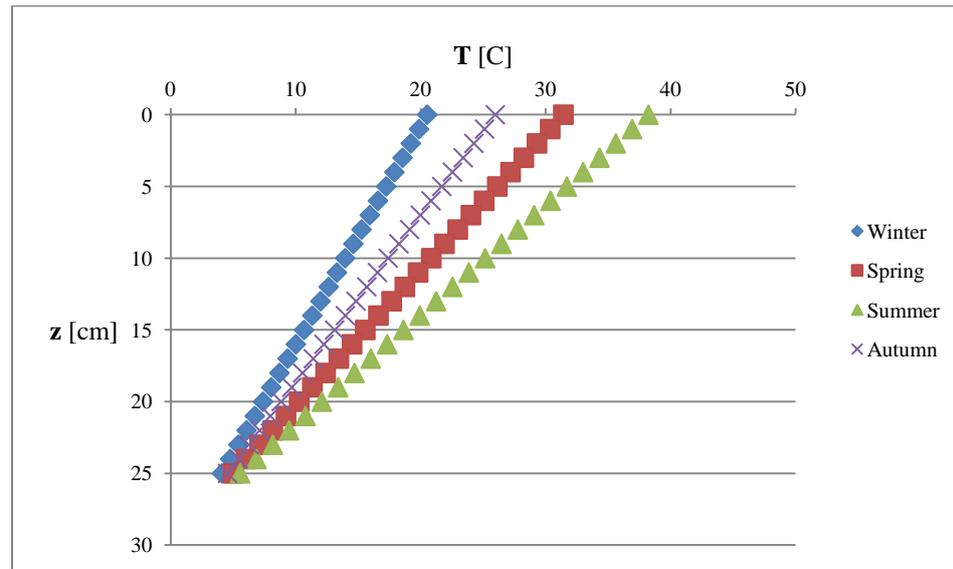


Fig 7.10 - Temperature trend inner pavement.

7.4.7. Interventions

The scheduled interventions, as before disclosed, are full-depth-repair, resurfacing and reconstruction. They can be so described:

- *Resurfacing* consists of the wearing course's replacement. Generally bituminous mixtures used for replacing can be different

from the previous one for typology and thickness. In such study the author considered the same material, it means 0HRMA, 30HRMA and 50HRMA depending on the strategy. It is realized getting ready the laying plan: wearing course milling, surface cleaning bond coat laying, bituminous mixture laying and compaction.

Such intervention improves gripping and regularity properties and bearing capacity as well because it removes superficial cracking that is the main cause of water's seepage.

The resurfacing's efficacy is evaluated according to the experience [4] equal to two-fifths of pavement design life.

- *Reconstruction* consists of demolition and reconstruction of binder layers: wearing course, binder and base. It is realized destroying earlier the old layers by means of milling then the reconstruction through the typical procedure: bond coat laying, bituminous mixture laying and compaction.

Such intervention improves gripping and regularity properties and bearing capacity.

The reconstruction's efficacy is equal to three-fifths of pavement design life.

- *Full-depth-repair* consists of demolition and reconstruction of binder layers and subbase. It is realized destroying earlier the old layers by means of milling then the reconstruction through the typical procedure: bond coat laying, bituminous mixture laying and compaction, subbase material laying and compaction. Before that it

needs, after demolition, to carry out plate load tests on subgrade in order to improve eventually its bearing capacity by means of subgrade recovery or a further compaction or the interjection of geotextiles and geomembranes among subgrade and subbase.

Such intervention improves gripping and regularity properties and bearing capacity.

The full-depth-repair's efficacy depends on the design life of the new layered pavement. So in the present study the chosen design life are 10, 20, 30 and 40 years.

Each intervention was divided into several operations. For each of them there is a suitable machine. Such equipment machineries are shown in Table 7.3. Each intervention can be so schematized.

Tab. 7.8 – Full Depth Repair operations.

| Full Depth Repair | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| | Operation Involved Layer |
| <u>DISMANTLING</u> | Milling Asphalt Layer |
| | Excavation Subbase |
| <u>SOIL WORKS</u> | Stabilisation Subgrade |
| | Laying Subbase |
| | Compaction Subbase |
| <u>BASE</u> | Laying Tack coat |
| | Laying Asphalt Layer |
| | Compaction Asphalt Layer |
| <u>BINDER</u> | Laying Tack coat |
| | Laying Asphalt Layer |
| | Compaction Asphalt Layer |
| <u>WEARING COURSE</u> | Laying Tack coat |
| | Laying Asphalt Layer |
| | Compaction Asphalt Layer |

Tab. 7.9 – Resurfacing operations.

| Resurfacing | | |
|---|-------------------|-----------------------|
| | Operation | Involved Layer |
| DISMA NTLIN G WEARING COURSE | Milling | Wearing course |
| | Laying | Tack coat |
| | Laying | Asphalt Layer |
| | Compaction | Asphalt Layer |

Tab. 7.10 – Reconstruction operations.

| Reconstruction | | |
|------------------------------|-------------------|-----------------------|
| | Operation | Involved Layer |
| DISMA NTLIN G | Milling | Asphalt Layer |
| BASE | Laying | Tack coat |
| | Laying | Asphalt Layer |
| | Compaction | Asphalt Layer |
| BINDER | Laying | Tack coat |
| | Laying | Asphalt Layer |
| | Compaction | Asphalt Layer |
| WEARING COURSE | Laying | Tack coat |
| | Laying | Asphalt Layer |
| | Compaction | Asphalt Layer |

Moreover, for each operation the duration has been calculated according to the intervention’s characteristics: geometry (layer thickness and section length and width) and available equipments (Table 7.11÷7.15).

| Design Life 10 years [0-30-50% RAP] | Year | 2013 - Full Depth Repair | | 2020 - Resurfacing | | 2024 - Reconstruction | | 2031 - Resurfacing | | 2035 - Reconstruction | | 2043 - Resurfacing | | 2047 - Reconstruction | | 2055 - Resurfacing | | 2059 - Reconstruction | | |
|--|-----------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-------------|
| | Operation | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | |
| | <u>DISMANTLING</u> | Milling | Asphalt Layer | 0.22 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.23 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.23 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.23 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.23 |
| | | Excavation | Subbase | 6.98 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | <u>SOIL WORKS</u> | Stabilisation | Subgrade | 0.07 | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | |
| | | Laying | Subbase | 8.70 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | | Compaction | Subbase | 0.07 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | <u>BASE</u> | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | 0.35 |
| | | Laying | Asphalt Layer | 0.14 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.14 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.16 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.16 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.18 |
| | | Compaction | Asphalt Layer | 0.21 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.21 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.23 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.23 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.25 |
| | | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | 0.35 |
| | | Laying | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.05 |
| | | Compaction | Asphalt Layer | 0.07 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.07 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.07 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.07 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.07 |
| | <u>WEARING COURSE</u> | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 |
| | | Laying | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 |
| | | Compaction | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 |
| | | Total [days] | | 17.62 | | 0.58 | | 1.82 | | 0.58 | | 1.86 | | 0.58 | | 1.86 | | 0.58 | | 1.90 |

Tab. 7.11 – Interventions’s durations for design life equal to 10 years.

| Design Life 20 years [0-30-50% RAP] | Year | 2013 - Full Depth Repair | | | 2022 - Resurfacing | | 2030 - Resurfacing | | 2038 - Reconstruction | | 2047 - Resurfacing | | 2055 - Resurfacing | |
|--|--------------------|--------------------------|-----------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|-----------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|------|
| | Operation | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | |
| | <u>DISMANTLING</u> | Milling | Asphalt Layer | 0.22 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.24 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.15 |
| | | Excavation | Subbase | 6.98 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | <u>SOIL WORKS</u> | Stabilisation | Subgrade | 0.07 | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | |
| | | Laying | Subbase | 8.70 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | | Compaction | Subbase | 0.07 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | <u>BASE</u> | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | |
| | | Laying | Asphalt Layer | 0.18 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.18 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | |
| | | Compaction | Asphalt Layer | 0.25 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.25 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | |
| | | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | |
| | | Laying | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | |
| | | Compaction | Asphalt Layer | 0.07 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.07 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | |
| | <u>BINDER</u> | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 |
| Laying | | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | |
| Compaction | | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | |
| Compaction | | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | |
| <u>WEARING COURSE</u> | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | |
| | Laying | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | |
| | Compaction | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | |
| Total [days] | | | 17.69 | | 0.58 | | 0.58 | | 1.90 | | 0.58 | | 0.58 | |

Tab. 7.12 – Interventions’s durations for design life equal to 20 years.

| Design Life 30 years [0-30-50% RAP] | Year | 2013 - Full Depth Repair | | 2022 - Resurfacing | | 2031 - Resurfacing | | 2040 - Resurfacing | | 2049 - Reconstruction | | 2059 - Resurfacing | | |
|--|---|--------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------------|-----------------|------|
| | Operation | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | |
| | <u>DISMANTLING</u> | Milling | Asphalt Layer | 0.22 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.24 | Wearing course | 0.15 |
| | | Excavation | Subbase | 6.98 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | <u>SOIL WORKS</u> | Stabilisation | Subgrade | 0.07 | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | |
| | | Laying | Subbase | 8.70 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | | Compaction | Subbase | 0.07 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | <u>WEARING COURSE</u> <u>BINDER</u> <u>BASE</u> | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | 0.35 | Tack coat | |
| | | Laying | Asphalt Layer | 0.18 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.23 | Asphalt Layer | |
| | | Compaction | Asphalt Layer | 0.26 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.32 | Asphalt Layer | |
| | | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | 0.35 | Tack coat | |
| | | Laying | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | |
| | | Compaction | Asphalt Layer | 0.07 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | 0.07 | Asphalt Layer | |
| Laying | | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | |
| Laying | | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | |
| Compaction | | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | |
| Total [days] | | | 17.71 | | 0.58 | | 0.58 | | 0.58 | | 2.02 | | 0.58 | |

Tab. 7.13 – Interventions’s durations for design life equal to 30 years.

| | Year | 2013 - Full Depth Repair | | 2023 - Resurfacing | | 2033 - Resurfacing | | 2043 - Resurfacing | | 2053 - Resurfacing | |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | Operation | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] |
| DISMANTLING | Milling | Asphalt Layer | 0.22 | Wearing course | 0.15 |
| | Excavation | Subbase | 6.98 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| SOIL WORKS | Stabilisation | Subgrade | 0.07 | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | |
| | Laying | Subbase | 8.70 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | Compaction | Subbase | 0.07 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| BASE | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | |
| | Laying | Asphalt Layer | 0.21 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | |
| | Compaction | Asphalt Layer | 0.30 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | |
| BINDER | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | |
| | Laying | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | |
| | Compaction | Asphalt Layer | 0.07 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | |
| WEARING COURSE | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 |
| | Laying | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 |
| | Compaction | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 |
| Total [days] | | | 17.77 | | 0.58 | | 0.58 | | 0.58 | | 0.58 |

Tab. 7.14 – Interventions’s durations for design life equal to 40 years – 0-30%RAP.

| | Year | 2013 - Full Depth Repair | | 2024 - Resurfacing | | 2035 - Resurfacing | | 2046 - Resurfacing | | 2057 - Resurfacing | | |
|---|-----------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-------------|
| | Operation | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | Layer | Duration [days] | |
| Design Life 40 years [50% RAP] | <u>DISMANTLING</u> | Milling | Asphalt Layer | 0.22 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.15 | Wearing course | 0.15 |
| | | Excavation | Subbase | 6.98 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | <u>SOIL WORKS</u> | Stabilisation | Subgrade | 0.07 | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | | Subgrade | |
| | | Laying | Subbase | 8.70 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | | Compaction | Subbase | 0.07 | Subbase | | Subbase | | Subbase | | Subbase | |
| | <u>BASE</u> | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | |
| | | Laying | Asphalt Layer | 0.21 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | |
| | | Compaction | Asphalt Layer | 0.30 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | |
| | <u>BINDER</u> | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | | Tack coat | |
| | | Laying | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | |
| | | Compaction | Asphalt Layer | 0.07 | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | | Asphalt Layer | |
| | <u>WEARING COURSE</u> | Laying | Tack coat | 0.35 | Tack coat | 0.35 |
| | | Laying | Asphalt Layer | 0.03 | Asphalt Layer | 0.03 |
| | | Compaction | Asphalt Layer | 0.05 | Asphalt Layer | 0.05 |
| | | Total [days] | | 17.77 | | 0.58 | | 0.58 | | 0.58 | | 0.58 |

Tab. 7.15 – Interventions’s durations for design life equal to 40 years – 50% RAP.

Therefore for each intervention it is known the duration in terms of days. The working day consists of 24 hours. It is necessary for LCCA calculations.

7.4.8. Alternative strategies

Maintenance strategies have been studied according to wearing course's rutting performance.

The author evaluated such performance in accordance with [5] in terms of *rut depth*, RD. Using the equation, rut depth can be estimated by computing value of roughness in terms of IRI (International Roughness Index), medium trucks AADT and structural number SN. The factor of time can be added into this model indirectly, it can be done through forecasting AADT by method of predicting growth and compounding.

$$\text{Log Rut Depth} = 0,415 + 0,1(IRI) + 5,473 \times 10^{-6}(AADT) - 0,004(SN)^2$$

AADT is gather from calculation before disclosed in 7.4.3. and SN is a function of layers' thickness and material.

IRI can be estimated by means several models present in the international literature [6]. they can be summarised in the following table.

Tab. 7.16 – Models for estimating International Roughness Index.

| | | |
|----------|-----------------|--|
| 1 | IRI (inch/mile) | $43 + 1,8 \times AGE + 0,0004 \times AADT$ |
| 2 | IRI (inch/mile) | $15 + 9,0 \times AGE + 0,0014 \times AADT$ |
| 3 | IRI (inch/mile) | $64 + 4,0 \times AGE + 0,0008 \times AADT$ |
| 4 | IRI (inch/mile) | $74 + 2,3 \times AGE + 0,000005 \times AADT$ |
| 5 | IRI (inch/mile) | $65 + 4,0 \times AGE + 0,00097 \times AADT$ |
| 6 | IRI (inch/mile) | $53 + 3,6 \times AGE + 0,00095 \times AADT$ |
| 7 | IRI (m/km) | $0,7849 \times e^{0,0587} \times AGE$ |

in which:

- AGE is the year number;
- AADT is the average annual daily traffic (vehicles/day).

In the case study model n.7 was chosen.

The pavement requires interventions to guaranty ride quality whenever RD reaches a value not allowed. Since in Italy there is not a target value for RD the author correlated it with PSI, Pavement Serviceability Index.

PSI is calculated for flexible pavements based on observations of rut depth (RD), slope variance (SV) and extent of cracking (C) and patching (P) (in ft² per 1000 ft² (1 ft² = 929 cm²) using [7]. It was developed as a result of AASHTO road tests in 1960 [8].

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log(1 + \overline{SV}) - 1,38 \overline{RD}^2 - 0,01 \sqrt{(C + P)}$$

Where:

\overline{SV} = average slope variance from both wheel paths;

\overline{RD} = average rut depth from both wheel path based on a 4 ft (1,22 mm) straight edge;

C = square feet of Class 2 and Class 3 cracking per 1000 ft² (92,9 m²);

P = patching in square feet per 1000 ft² (92,9 m²).

Cracking and patching were not included in the calculation of the current PSI for the test sections. Significant quantities of cracking and patching were noted on only a few of the test sections, and the impact of this term was not considered significant, because its coefficient is only 0.01.

From this equation RD target value was calculated considering a PSI value equal to 2.5 in accordance with Federal Highway Administration [9].

PSI theoretically ranges between 5 and 0, the actual range for real pavements is between about 4.5 to 1.5. The initial serviceability index p_0 corresponds to road conditions immediately after construction. A typical value of p_0 for flexible pavements is 4.2. The terminal serviceability index p_t is defined as the lowest serviceability that will be tolerated before rehabilitation or reconstruction becomes necessary. A terminal serviceability index of 2.5 or higher is recommended for design of major

highways. Thus, a typical allowable serviceability loss due to traffic for flexible pavements can be expressed as:

$$\Delta PSI = p_t - p_0 = 4,2 - 2,5$$

So PSI equal to 2,5 represents the worst condition of regularity. Every time RD reaches such value it needs to carry out an intervention in order to reactivate good condition for ride quality. So the following alternative strategies have been studied. They depend on the percentage of RAP and the design life.

Tab. 7.17 – Interventions strategies.

| 0-30% RAP | | 50% RAP | |
|------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------------------------|
| Year | Intervention | Year | Intervention |
| 0 | Full Depth Repair (10years) | 0 | Full Depth Repair (10years) |
| 7 | Resurfacing | 7 | Resurfacing |
| 11 | Reconstruction | 11 | Reconstruction |
| 18 | Resurfacing | 18 | Resurfacing |
| 22 | Reconstruction | 22 | Reconstruction |
| 30 | Resurfacing | 30 | Resurfacing |
| 34 | Reconstruction | 34 | Reconstruction |
| 42 | Resurfacing | 42 | Resurfacing |
| 46 | Reconstruction | 46 | Reconstruction |
| 50 | Limito f Analysis | 50 | Limito f Analysis |

| 0-30% RAP | | 50% RAP | |
|------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Year | Intervention | Year | Intervention |
| 0 | Full Depth Repair (20years) | 0 | Full Depth Repair (20years) |
| 9 | Resurfacing | 9 | Resurfacing |
| 17 | Resurfacing | 17 | Resurfacing |
| 25 | Reconstruction | 25 | Reconstruction |
| 34 | Resurfacing | 34 | Resurfacing |
| 42 | Resurfacing | 42 | Resurfacing |
| 50 | Limit of Analysis | 50 | Limit of Analysis |

| 0-30% RAP | | 50% RAP | |
|------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Year | Intervention | Year | Intervention |
| 0 | Full Depth Repair (30years) | 0 | Full Depth Repair (30years) |
| 9 | Resurfacing | 9 | Resurfacing |
| 18 | Resurfacing | 18 | Resurfacing |
| 27 | Resurfacing | 27 | Resurfacing |
| 36 | Reconstruction | 36 | Reconstruction |
| 46 | Resurfacing | 46 | Resurfacing |
| 50 | Limit of Analysis | 50 | Limit of Analysis |

| 0-30% RAP | | 50% RAP | |
|------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Year | Intervention | Year | Intervention |
| 0 | Full Depth Repair (40years) | 0 | Full Depth Repair (40years) |
| 10 | Resurfacing | 11 | Resurfacing |
| 20 | Resurfacing | 22 | Resurfacing |
| 30 | Resurfacing | 33 | Resurfacing |
| 40 | Resurfacing | 44 | Resurfacing |
| 50 | Limit of Analysis | 50 | Limit of Analysis |

It can be observed the alternative strategies for 0 and 30 percentage of RAP are the same, because of their rutting behaviour is very similar. It is shown as well as by results obtained with Wheel Tracker Machine (Fig. 7.11) [10].

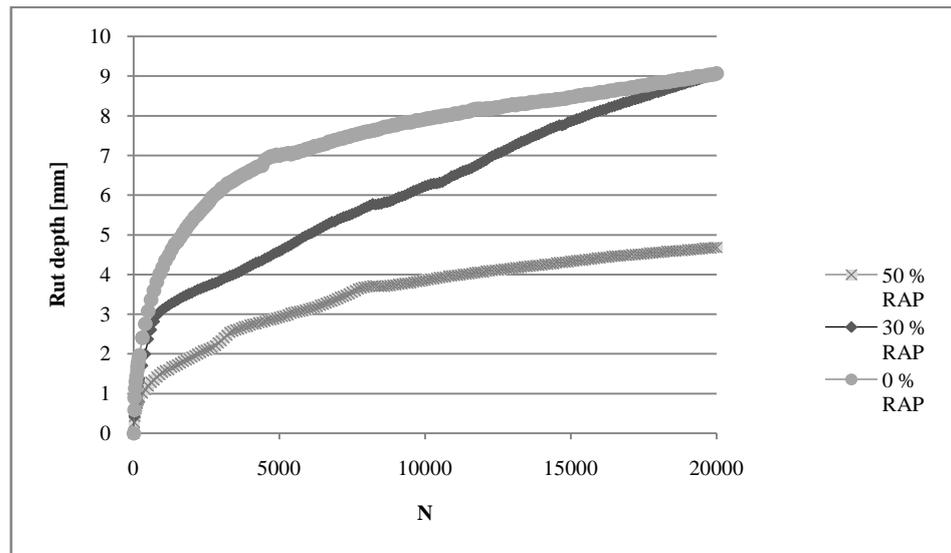


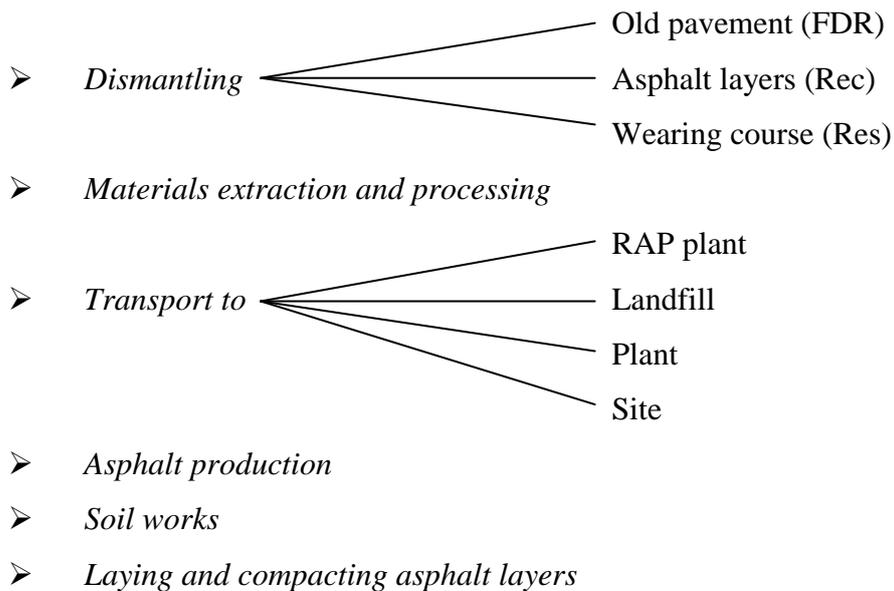
Fig. 7.11 – WTM output.

Planned interventions for each strategy belong to rehabilitation category, infact they require a design for thickness and material that have to be used and, at the same time, allow to extend the pavement life until to reach the analysis period, equal to 50 years as before disclosed.

So, after each intervention, the pavement regularity has been investigated. Furthermore at the intervention's year the pavement design, wearing course for resurfacing and all binder layers for reconstruction, has been carried out.

7.5. Global Warming Potential results

Each strategy was environmentally evaluated by means of asPECT as before disclosed. Such evaluation consists of several items in order to consider every intervention's operation. In particular they are:



The following tables show every emission's voice for DL10-0HRMA, DL10-30HRMA, DL10-50HRMA, DL20-0HRMA, DL20-30HRMA, DL20-50HRMA, DL30-0HRMA, DL30-30HRMA, DL30-50HRMA, DL50-0HRMA, DL50-30HRMA, DL50-50HRMA.

Tab. 7.18 – Emissions.

| | Emissions [MkgCO _{2e}] | | Normalised value |
|-------------|--|-----|-----------------------------------|
| DL10 | <i>0HRMA</i> | 548 | 1.00 |
| | <i>30HRMA</i> | 508 | 0.93 |
| | <i>50HRMA</i> | 502 | 0.92 |
| DL20 | <i>0HRMA</i> | 325 | 0.59 |
| | <i>30HRMA</i> | 318 | 0.58 |
| | <i>50HRMA</i> | 311 | 0.57 |
| DL30 | <i>0HRMA</i> | 372 | 0.68 |
| | <i>30HRMA</i> | 365 | 0.67 |
| | <i>50HRMA</i> | 357 | 0.65 |
| DL40 | <i>0HRMA</i> | 225 | 0.41 |
| | <i>30HRMA</i> | 217 | 0.40 |
| | <i>50HRMA</i> | 211 | 0.39 |

The predominant item is the transport as you can observe in Fig. 7.12.

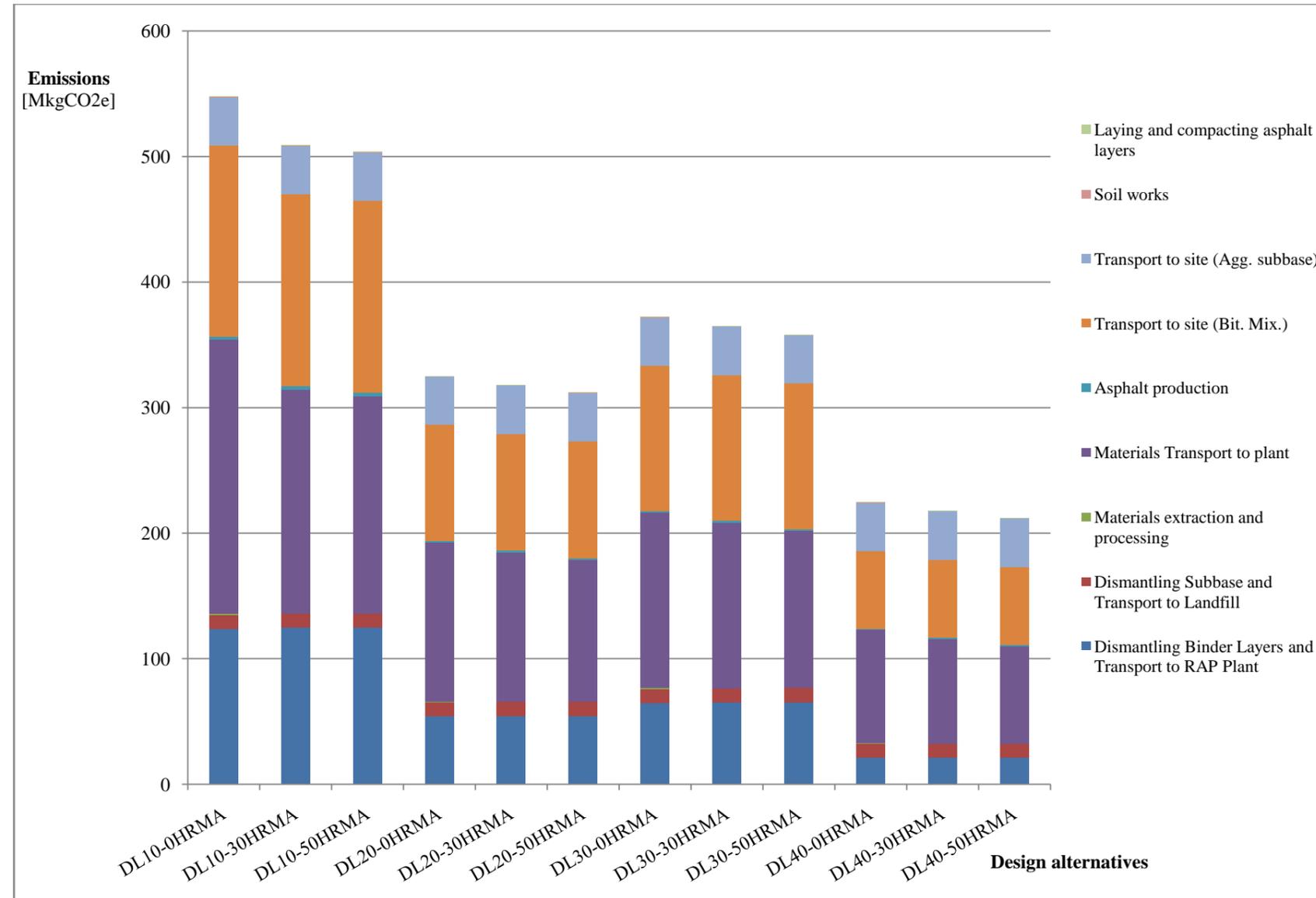


Fig. 7.12 – Emissions.

Such results were obtained according to asPECT’s assumptions and rate

Comparing all alternative strategies (Fig. 7.13-7.14) it is evident that DL40 represents the best alternative in terms of environmental impact. Moreover the comparison underlines there is no great difference between DL20 and DL30, caused by the number of interventions within the alternative: they are very similar.

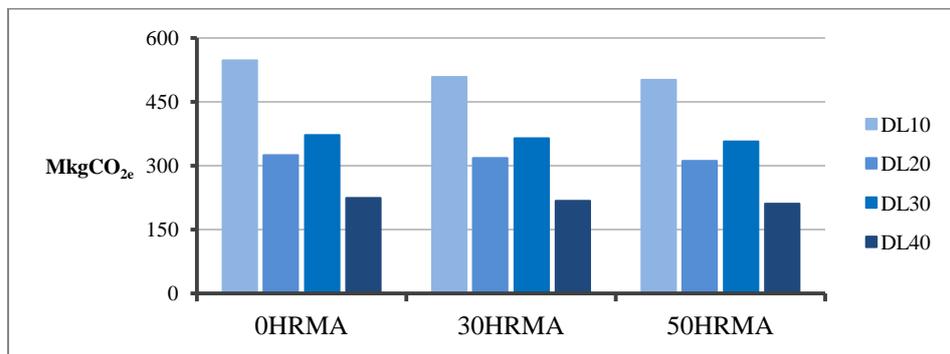


Fig. 7.13 – Alternative strategies comparison (MkgCO_{2e} vs %RAP).

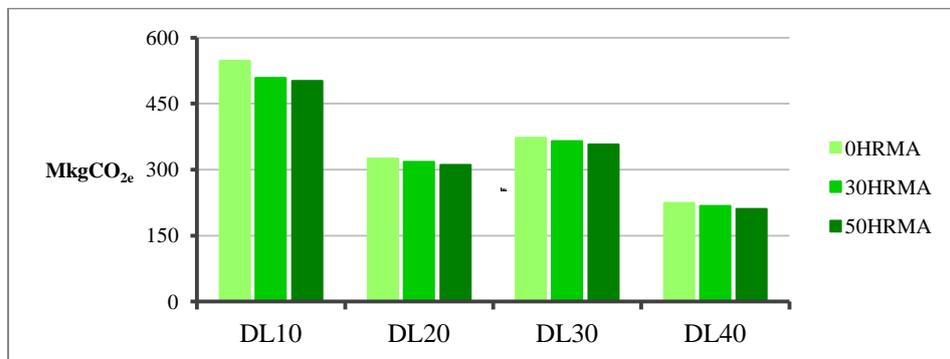


Fig. 7.14 – Alternative strategies comparison (MkgCO_{2e} vsDL).

7.6. Economic results

As before disclosed costs here calculated are agency cost and users cost.

To determine the long-term cost effects of pavement design, a manual life-cycle cost analysis is implemented to twelve alternative strategies. Each alternative is subject to a performance prediction model, specifically Rut Depth prediction (Paragraph 7.4.8.), which allows the planning of maintenance and rehabilitation strategies for the service life of the road.

Agency cost has been calculated according to [2]. Specifically construction cost depends on intervention's typology, duration and equipments used and engineering cost is assumed equal to the 30% of construction one.

Users cost depends on the queue in terms of length and time to spent passing through the queue. It is strictly function of traffic and work-zone geometry (Paragraph 7.3.).

Costs have been calculated for each alternative strategy (Tab. 7.19)

Tab. 7.19 – Net Present Value.

| | Net Present Value [1000 €] | Normalised value | |
|-------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------|
| | <i>0HRMA</i> | 9410 | 1,00 |
| DL10 | <i>30HRMA</i> | 8719 | 0,93 |
| | <i>50HRMA</i> | 7338 | 0,78 |
| | <i>0HRMA</i> | 5000 | 0,53 |
| DL20 | <i>30HRMA</i> | 4576 | 0,49 |
| | <i>50HRMA</i> | 3738 | 0,40 |
| | <i>0HRMA</i> | 5666 | 0,60 |
| DL30 | <i>30HRMA</i> | 5244 | 0,56 |
| | <i>50HRMA</i> | 4399 | 0,47 |
| | <i>0HRMA</i> | 3710 | 0,39 |
| DL40 | <i>30HRMA</i> | 3395 | 0,36 |
| | <i>50HRMA</i> | 2807 | 0,30 |

Every cost has been actualized in order to characterize each alternative strategy by a number, NPV (Net Present Value). The discount rate for the actualization has been calculated from discount rate and inflation historic series to discount costs from *TUS* (*Ex Italian Official Cash Rate – Ex Tasso Ufficiale di Sconto*) of Bank of Italy. *TUS* is the rate of interest which the central bank charges on overnight loans to commercial banks. This allows the Central Bank to adjust the interest rates in each of the nations's economies.

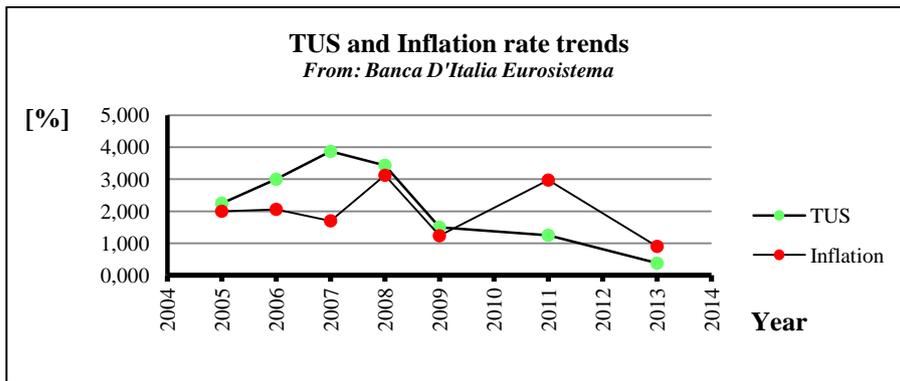


Fig. 7.15- TUS and Inflation rate trends.

The comparison shows the best strategy is DL40-50HRMA: it consists of a discount of 70% compared to the worst alternative strategy, DL10-0HRMA.

Similar to the environmental results there is no great difference between DL20 and DL30. It is clarified by the same reasons.

7.7. Merging results

In SPES the environmental and economic sustainability of an alternative designed, compared to the other ones taken into account in the process, is evaluated through the SPES number S_n (Parag. 6.4.) so computed:

$$S_n = e_n + c_n + r_n$$

Where:

$$e_n = \frac{E_n}{E_w} \qquad c_n = \frac{C_n}{C_w} \qquad r = 1 - \frac{\%RAP}{100}$$

e_n = environmental ratio for the n-strategy;

c_n = economic value for the n-strategy;

r_n = material value

E_w = environmental value for the worst strategy;

C_w = economic value for the worst strategy.

In such case study obtained values are following revealed:

Tab. 7.20 – SPES results.

| <i>Design Life</i> | <i>RAP</i> [%] | e_n | c_n | r_n | S_n |
|--------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------------|
| 10 | 0 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 3,00 |
| | 30 | 0,93 | 0,93 | 0,70 | 2,55 |
| | 50 | 0,92 | 0,78 | 0,50 | 2,20 |
| 20 | 0 | 0,59 | 0,53 | 1,00 | 2,12 |
| | 30 | 0,58 | 0,49 | 0,70 | 1,77 |
| | 50 | 0,57 | 0,40 | 0,50 | 1,46 |
| 30 | 0 | 0,68 | 0,60 | 1,00 | 2,28 |
| | 30 | 0,67 | 0,56 | 0,70 | 1,92 |
| | 50 | 0,65 | 0,47 | 0,50 | 1,62 |
| 40 | 0 | 0,41 | 0,39 | 1,00 | 1,80 |
| | 30 | 0,40 | 0,36 | 0,70 | 1,46 |
| | 50 | 0,39 | 0,30 | 0,50 | 1,18 |

Results obtained from SPES show both partial and cumulative results. Specifically, within each design life, reading along DL row, the increase of using RAP improves the alternative in terms of both emissions and costs.

Furthermore, from a full comparison it deduces the best strategy is DL40-50HRMA. It strictly depends on the design life and maintenance strategy as well, because it allows to optimize costs, spending more at the beginning of the investment, and emissions during analysis period due to the reduced number of interventions.

7.8. Summary and conclusions

The SPES has been described in this thesis. SPES evaluates alternatives design using a system based on the comparison of each strategy by means of a normalization of results obtained from the application of life cycle assessment and life cycle cost analysis tools. The evaluation consists of steps including pavement design, M&R strategies identification, conducting LCA and LCCA. For the environmental impact the only criterion here considered was GHG emissions by means of asPECT software. The economic analysis was conducted by means of an excel spreadsheet based on a long-term assessment of the cost taking into account an analysis period and a discount rate. Finally, the rating system through the normalization allows to evaluate each alternative design compared to the worst one.

The conclusion of this study, based on the case study as well, can be so summarized:

- Using recycled materials, specifically RAP in the wearing course, produces benefits in terms of emissions (Tab. 7.18), costs (Tab. 7.19) and reduces the use of landfill.
- Reductions of GHG emissions is not significant within a DL (Design Life) because of the number of interventions it is almost the same; instead it is substantial increasing DL. It strictly also depends on the number and typology of interventions.

- Reduction of costs, like shown in Tab.7.19, was reached using recycled materials and designing pavement with a DL bigger.

It is desirable for further works to include more parameters in the evaluation in order to improve the results. Other parameters could be rolling resistance, traffic emissions due to the queue, more typologies of interventions and more criteria for environmental impacts (e.g. energy and water consumption). So it represents a starting point to evaluate inner a process, specifically road pavement construction and maintenance, the best solution. A further improvement could be reached introducing a weight for each parameter in order to more emphasize an aspect then another one. It would allow to change the main interest in the evaluation depending on who it concerns each time.

The cultural challenge, rather than technical or/and economic, is to consider management strategy of road pavement as well as an investment over a suitable time horizon. In other words the investment involving the biggest initial amount of money (maximum design life) comes out the best solution in terms of sustainability.

References

- [1] “Codice della Strada” D.Lgs. n. 285/1992 e ss.mm.ii., Art. 2

- [2] G. Di Mino. Lecture Notes of Management delle Infrastrutture Viarie course “*Tecniche e costi di intervento*”, 2010.

- [3] O. Fonseca and M.W. Witzak. “*A Prediction Methodology for the Dynamic Modulus of In-Place Aged Asphalt Mixtures*”, Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 65, 1996.

- [4] Regione Lombardia – Direzione Generale Infrastrutture e Mobilità. “*Catalogo dei dissesti delle pavimentazioni stradali*”, Allegato B, 2005.

- [5] A.H.M. Lt Col, M.M Dadang and T.H. Law. “*Pavement performance model for federal roads*”, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, 428-440, 2005.

- [6] Regione Lombardia - Direzione Generale Infrastrutture e Mobilità.. “*Criteri per lo sviluppo di sistemi di gestione della manutenzione delle pavimentazioni stradali*”, Novembre 2005.

- [7] J. Bednar. “Pavement performance curves: four case studies”, Public Roads, Vol. 53, 90–99, 1989.

- [8] The AASHO Road Test, Report 5, Pavement Research, HRB Special Report 61E, National Research Council, Washington, D.C., 1962.

- [9] Geotechnical Aspects of Pavement – Reference Manual – Appendix C, 1993, AASHTO Design Method, <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/05037/ac.cfm>.

- [10] Ente Nazionale Italiano di Unificazione UNI EN 12697-22, “*Metodo della traccia delle ruote (Wheel tracking)*”, 2004.