

F. Annunziata – E. Cecere – M. Coni
F. Maltinti – F. Pinna – S. Portas

PROGETTAZIONE STRADALE

DALLA RICERCA AL DISEGNO DELLE STRADE

INDICE

Prefazione	pag. 11
Introduzione	» 15
1. NORME PER GLI INTERVENTI DI ADEGUAMENTO DELLE STRADE ESISTENTI	
1.1. Premessa	» 21
1.2. Il campo normativo di riferimento	» 22
1.3. La nuova norma per gli interventi di adeguamento delle strade esistenti	» 28
1.3.1. Definizioni	» 29
1.3.2. Campo di applicazione della normativa allo studio	» 31
1.3.3. Definizione degli obiettivi prestazionali	» 33
1.3.3.1. Gli obiettivi di sicurezza della circolazione	» 34
1.3.3.2. Gli obiettivi di funzionalità operativa	» 35
1.3.4. Precisazioni in merito alla definizione degli obiettivi	» 36
1.3.4.1. La sicurezza della circolazione	» 36
1.3.4.2. L'accessibilità territoriale	» 37
1.3.4.3. Obiettivi innovativi	» 38
1.3.5. Definizione e progettazione degli interventi di adeguamento	» 41
1.3.5.1. Gli interventi di adeguamento strutturali	» 42
1.3.5.2. Gli interventi di adeguamento non strutturali	» 45
1.3.5.3. Precisazioni in merito agli interventi di adeguamento strutturali	» 46
1.3.6. Definizione dei tratti di transizione	» 47
1.3.7. Il documento "Analisi di sicurezza"	» 48
1.3.8. Il monitoraggio degli interventi	» 48
1.4. Precisazioni concettuali in merito ai differenti interventi di adeguamento	» 50
1.5. Conclusioni	» 58
Bibliografia	» 59
Normativa	» 59
2. MODELLI ECONOMETRICI PER I TRASPORTI	
2.1. Inquadramento generale	» 61
2.2. I modelli previsionali	» 62
2.2.1. La varietà degli approcci possibili	» 62
2.3. L'analisi delle serie storiche	» 64
2.3.1. Considerazioni generali	» 64
2.3.2. Processi stocastici utilizzati in econometria	» 66
2.3.3. Il test di radice unitaria	» 71
2.4. La ricerca dei legami funzionali	» 73
2.4.1. La procedura tradizionale	» 73
2.4.1.1. La verifica delle ipotesi	» 74
2.4.1.2. Verifiche sulla bontà del modello	» 76
2.4.1.3. I test di significatività	» 77
2.4.2. Considerazioni introduttive: il metodo VAR	» 78
2.4.3. Il metodo della cointegrazione	» 79
2.4.3.1. Premessa	» 81
2.4.3.2. Il meccanismo a correzione d'errore	» 81
2.4.3.3. I primi studi sulla cointegrazione	» 83
2.4.3.4. Il metodo di Johansen	» 84
2.5. Esempi applicativi	» 88
2.6. Conclusioni	» 102
Bibliografia	» 103

3. LE TECNICHE COSTRUTTIVE DEI SOLIDI VIARI	
3.1. Introduzione: problematiche riguardanti il corpo stradale	» 107
3.2. Caratteristiche dei materiali leggeri	» 110
3.3. Impiego dei materiali leggeri nelle costruzioni viarie	» 115
3.4. Aspetti ambientali	» 117
3.5. Impiego dell'EPS per risolvere l'“effetto diga sotterraneo”.....	» 117
3.6. Convenienza di impiego	» 123
3.7. Normative europee	» 124
Bibliografia	» 125
4. LA PROGETTAZIONE E LA MANUTENZIONE DELLE SOVRASTRUTTURE PER LE DIFFERENTI INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO	
4.1. Introduzione.....	» 127
4.1.1. Generalità	» 127
4.1.2. Principi meccanicistici ed empirici delle procedure progettuali.....	» 130
4.1.3. Finalità e approccio al problema.....	» 135
4.1.4. Prestazioni delle sovrastrutture	» 139
4.1.5. Caratterizzazione del traffico	» 142
4.1.6. Caratterizzazione dei materiali	» 142
4.1.7. Modellazione strutturale delle pavimentazioni	» 143
4.1.8. Valutazione delle pavimentazioni esistenti per la loro riabilitazione	» 145
4.1.9. Strategie di riabilitazione	» 146
4.1.10. Affidabilità del dimensionamento.....	» 147
4.2. Parametri di input per sottofondi e fondazioni	» 152
4.2.1. Introduzione.....	» 152
4.2.2. Caratterizzazione delle fondazioni e del piano di posa	» 152
4.2.3. Test di laboratorio sui sottofondi	» 153
4.2.4. Identificazione e trattamento di condizioni critiche del piano di posa....	» 154
4.2.5. Miglioramento e rinforzo dei piani di posa	» 157
4.3. Caratterizzazione dei materiali	» 158
4.3.1. Introduzione.....	» 158
4.3.2. Parametri di input per i materiali bituminosi	» 158
4.3.3. Parametri di input per le pavimentazioni in calcestruzzo.....	» 160
4.3.4. Caratterizzazione dei materiali stabilizzati chimicamente	» 160
4.3.5. Caratterizzazione dei materiali granulari e dei sottofondi	» 160
4.3.6. Parametri di input per il bedrock	» 161
4.4. Effetti ambientali	» 161
4.4.1. Generalità sui fattori climatici.....	» 161
4.4.2. Effetti dei fattori climatici sul modulo resiliente	» 162
4.5. Distribuzione della temperatura nelle sovrastrutture	» 168
4.6. Valutazione dei carichi da traffico.....	» 170
4.6.1. Introduzione.....	» 170
4.6.2. Dati e fattori di traffico per il dimensionamento delle sovrastrutture stradali	» 172
4.6.3. Caratterizzazione dei carichi in ambito aeroportuale	» 177
4.6.4. Specificità in ambito urbano	» 180
4.7. Il progetto di pavimentazioni flessibili	» 181
4.7.1. Introduzione	» 181
4.7.2. Modello di risposta della sovrastruttura	» 186
4.8. Valutazione delle pavimentazioni esistenti per la determinazione dei criteri di riabilitazione	» 189
4.8.1. Introduzione.....	» 189
4.8.2. Raccolta e catalogazione dei dati	» 192
4.9. Definizione delle strategie di riabilitazione delle strade esistenti.....	» 196

4.9.1. Introduzione	» 196
4.9.2. Principali strategie di riabilitazione	» 196
4.9.3. Ricostruzione con o senza aggiunta di corsie aggiuntive	» 197
4.9.4. Ripristino strutturale degli strati della sovrastruttura attraverso la stesa di nuovi strati	» 198
4.9.5. Stesa di HMCA su una pavimentazione flessibile, rigida o semirigida esistente	» 198
4.9.6. Sovrapposizione di PCC, legato o non legato, su una pavimentazione rigida o semi rigida esistente (JPCP e CRCP).....	» 199
4.9.7. Sovrapposizione di PCC, legato o non legato, su una pavimentazione flessibile esistente.....	» 200
4.9.8. Ripristino delle condizioni superficiali attraverso la stesa di nuovi strati..	» 201
4.9.9. Ripristino senza la stesa di nuovi strati.....	» 201
4.9.10. Trattamenti preventivi	» 203
4.9.11. Riciclaggio di pavimentazioni esistenti e materiali e tecniche alternative	» 203
Bibliografia	» 205
5. AREE URBANE E MODERAZIONE DEL TRAFFICO	
5.1. L'uomo e le strade urbane	» 207
5.2. La sicurezza in ambito urbano	» 209
5.2.1. L'incidentalità nelle aree urbane	» 210
5.2.2. I limiti umani	» 211
5.3. Prime conclusioni generali	» 213
5.4. L'evoluzione della moderazione del traffico - generalità e obiettivi	» 214
5.5. La percezione del pericolo e le strategie di intervento	» 216
5.5.1. La percezione visiva	» 216
5.5.2. La percezione sonora.....	» 219
5.5.3. La percezione di movimento.....	» 220
5.6. Alcune considerazioni sulla moderazione del traffico	» 220
5.7. I risultati conseguiti dagli interventi di moderazione del traffico.....	» 228
5.7.1. Gli effetti sulla velocità e sul volume di traffico	» 228
5.7.2. Gli effetti sull'incidentalità	» 231
5.7.3. Gli effetti sulla qualità della vita.....	» 232
5.7.4. Gli effetti sui centri storici	» 233
5.7.5. Gli effetti estetici.....	» 234
5.7.6. Gli effetti sulla criminalità	» 235
5.7.7. Gli effetti sui valori dei beni immobili	» 235
5.7.8. Gli effetti sui mezzi di emergenza	» 236
5.8. Strategie attive e passive nelle misure di moderazione del traffico	» 238
5.9. La distribuzione degli interventi di moderazione del traffico.....	» 238
5.10. Misure di controllo del volume e della velocità	» 240
5.11. Le tendenze applicative	» 240
5.11.1. La scelta della tipologia da adottare	» 240
5.11.2. La combinazione delle misure	» 241
5.11.3. Gli interventi complessi	» 242
5.12. Gli interventi puntuali passivi: le misure di controllo del volume di traffico	» 243
5.13. Gli interventi puntuali passivi: le misure di controllo della velocità	» 244
5.13.1. La costruzione tradizionale	» 244
5.13.2. Il rilievo elettronico della velocità mediante radar speed trailer o autovelox	» 244
5.13.3. Le campagne di sensibilizzazione pubblica	» 245
5.13.4. Il programma di monitoraggio della velocità nei quartieri.....	» 246
5.13.5. La segnaletica di limitazione della velocità	» 246
5.13.6. La segnaletica di STOP	» 246
5.13.7. La segnaletica di DARE PRECEDENZA	» 247

5.13.8. Il cartello di INTERSEZIONE CON PRECEDENZA A DESTRA	» 248
5.13.9. I segnali di pericolo	» 248
5.13.10. Le zone a porta	» 249
5.14. Gli interventi puntuali passivi: l'influenza psicologica della percezione	» 251
5.14.1. Gli attraversamenti pedonali	» 252
5.14.2. I sistemi di rallentamento ad effetto ottico ed acustico	» 258
5.14.3. I trattamenti cromatici della pavimentazione	» 259
5.14.4. I catarifrangenti	» 261
5.14.5. L'illuminazione stradale	» 262
5.15. La segnaletica	» 270
5.15.1. La segnaletica e il Codice della strada	» 271
5.15.2. La progettazione dei piani di segnalamento degli itinerari stradali	» 273
5.15.3. La segnaletica e le istruzioni C.N.R. in Italia	» 278
5.16. Gli interventi puntuali attivi: alcune indicazioni di carattere generale	» 284
5.17. Gli interventi puntuali attivi: le misure di controllo del volume di traffico	» 286
5.17.1. Le chiusure totali delle strade	» 286
5.17.2. Le chiusure parziali delle strade	» 289
5.17.3. I deviatori diagonali	» 293
5.17.4. I sensi unici	» 297
5.17.5. Le isole di obbligo di svolta	» 298
5.17.6. Le barriere intermedie	» 303
5.18. Gli interventi puntuali attivi: le misure verticali di controllo della velocità	» 305
5.18.1. Le curvature verticali e la velocità dei veicoli	» 305
5.18.2. I dossi	» 307
5.18.3. Le platee rialzate e gli attraversamenti pedonali rialzati	» 315
5.18.4. I cuscini berlinesi	» 329
5.18.5. Le intersezioni rialzate o platee di incrocio	» 333
5.18.6. Le pavimentazioni in conci	» 336
5.18.7. Le strisce di pavimentazione stradale in rilievo	» 337
5.19. Gli interventi puntuali attivi: le misure orizzontali di controllo della velocità ..	» 341
5.19.1. Le curvature orizzontali e la velocità dei veicoli	» 341
5.19.2. Le rotoatorie	» 342
5.19.3. Le isole di traffico circolari	» 353
5.19.4. Le <i>chicane</i> e i disassamenti orizzontali o spostamenti dell'asse stradale e delle corsie	» 360
5.19.5. I riallineamenti di intersezioni	» 372
5.20. Gli interventi puntuali attivi: i restringimenti per il controllo della velocità	» 373
5.20.1. I restringimenti laterali della carreggiata	» 373
5.20.2. Le isole centrali spartitraffico	» 382
5.20.3. I restringimenti della carreggiata alle intersezioni	» 391
5.20.4. Le corsie polivalenti	» 396
5.21. Gli interventi lungo l'asse e gli interventi coordinati	» 397
5.21.1. La combinazione delle misure: il ridisegno delle intersezioni	» 397
5.21.2. Gli interventi lungo l'asse: le strade o zone residenziali	» 403
5.21.3. Gli interventi lungo l'asse: le zone 30	» 411
5.21.4. Gli interventi coordinati: le utenze deboli e la normativa italiana	» 415
5.21.5. Gli interventi coordinati: i percorsi e le aree pedonali	» 418
5.21.6. Gli interventi coordinati: i percorsi ciclabili	» 432
5.21.7. Gli interventi coordinati: le isole ambientali	» 446
5.21.8. Gli interventi coordinati: le zone a traffico limitato	» 447
5.21.9. Gli interventi coordinati: le nuove soluzioni urbanistiche	» 448
Bibliografia	» 450
6. LE ROTATORIE	
6.1. La lunga genesi delle rotoatorie	» 453

6.2. Criteri generali di progettazione geometrica delle rotatorie	» 459
6.2.1. Le scelte preliminari	» 459
6.2.2. I principali elementi geometrici planimetrici	» 461
6.2.3. I principali elementi geometrici altimetrici.....	» 464
6.3. La progettazione geometrica delle rotatorie in Italia	» 465
6.3.1. Il Codice della strada.....	» 465
6.3.2. Lo studio a carattere prenormativo: elementi geometrici planimetrici e altimetrici	» 468
6.4. La progettazione geometrica delle rotatorie in Svizzera.....	» 475
6.4.1. I principali elementi geometrici planimetrici	» 476
6.4.2. I principali elementi geometrici altimetrici.....	» 481
6.4.3. Le condizioni di visibilità	» 482
6.4.4. Altre considerazioni dedotte dall'esperienza svizzera	» 484
6.5. La progettazione geometrica delle rotatorie in Francia	» 486
6.5.1. I principali elementi geometrici planimetrici e altimetrici	» 486
6.5.2. Le condizioni di visibilità	» 490
6.5.3. Le grandi rotatorie.....	» 491
6.5.4. Le rotatorie compatte	» 492
6.5.5. Le mini-rotatorie	» 494
6.5.6. Altre tipologie di rotatorie previste dalla normativa francese	» 497
6.5.7. La segnaletica adottata in Francia.....	» 500
6.6. La progettazione geometrica delle rotatorie in Gran Bretagna.....	» 501
6.6.1. I principali elementi geometrici planimetrici e altimetrici	» 504
6.6.2. Le condizioni di visibilità	» 505
6.7. La progettazione geometrica delle rotatorie negli Stati Uniti.....	» 507
6.7.1. Le principali tipologie di rotatorie presenti negli Stati Uniti	» 510
6.7.2. Le scelte preliminari	» 515
6.7.3. I principali elementi geometrici planimetrici	» 523
6.7.4. I principali elementi geometrici altimetrici.....	» 540
6.7.5. Le condizioni di visibilità	» 543
6.7.6. Altre tipologie di rotatorie previste dalla normativa statunitense.....	» 547
6.7.7. Altre considerazioni dedotte dall'esperienza statunitense	» 548
6.8. La progettazione geometrica delle rotatorie in Australia	» 549
6.8.1. I principali elementi geometrici planimetrici e altimetrici	» 549
6.8.2. Le condizioni di visibilità	» 551
6.9. Criteri generali per il calcolo della capacità delle rotatorie	» 553
6.9.1. Le manovre di intreccio e immissione	» 553
6.9.2. I metodi di calcolo.....	» 555
6.10. Il calcolo della capacità delle rotatorie in Italia	» 557
6.10.1. Il metodo adottato per il calcolo della capacità di una generica rotatoria	» 558
6.10.2. Il metodo adottato per il calcolo della capacità di una rotatoria urbana..	» 562
6.10.3. Un'applicazione del metodo adottato per il calcolo della capacità di una generica rotatoria	» 563
6.11. Il calcolo della capacità delle rotatorie in Svizzera	» 566
6.12. Il calcolo della capacità delle rotatorie in Francia	» 569
6.13. Il calcolo della capacità delle rotatorie in Gran Bretagna	» 572
6.14. Il calcolo della capacità delle rotatorie in Germania	» 575
6.15. Il calcolo della capacità delle rotatorie negli Stati Uniti.....	» 578
6.15.1. I parametri di calcolo utilizzati	» 578
6.15.2. I metodi adottati per il calcolo della capacità delle rotatorie	» 583
6.15.3. La valutazione delle prestazioni delle rotatorie	» 586
6.15.4. La distribuzione dei varchi accettati	» 589
6.16. Il calcolo della capacità delle rotatorie in Australia	» 591
6.16.1. I metodi utilizzati per il calcolo della capacità delle rotatorie	» 591

6.16.2. Il rallentamento	»	594
6.17. Un confronto fra le formule adottate nei diversi paesi	»	597
6.18. I percorsi pedonali in intersezioni a raso di tipo rotatorio	»	598
6.18.1. I percorsi pedonali e la normativa italiana sulle rotatorie	»	599
6.18.2. I percorsi pedonali e la normativa francese sulle rotatorie	»	600
6.18.3. I percorsi pedonali e la normativa inglese sulle rotatorie	»	601
6.18.4. I percorsi pedonali e la normativa statunitense sulle rotatorie	»	601
6.19. I percorsi ciclabili in intersezioni a raso di tipo rotatorio	»	602
6.19.1. I percorsi ciclabili e la normativa italiana sulle rotatorie	»	604
6.19.2. I percorsi ciclabili e la normativa francese sulle rotatorie	»	605
6.19.3. I percorsi ciclabili e la normativa olandese sulle rotatorie	»	606
6.19.4. I percorsi ciclabili e la normativa statunitense sulle rotatorie	»	609
Bibliografia	»	610
7. LA VALUTAZIONE ECONOMICA DI UN PROGETTO		
7.1. L'analisi economica	»	613
7.1.1. Il problema della scelta fra alternative progettuali	»	613
7.2. L'analisi costi-benefici	»	614
7.2.1. Illustrazione del metodo ABC.....	»	618
7.2.2. Criticità dell'ABC	»	623
7.3. L'analisi multicriteria e la valutazione di impatto ambientale	»	624
7.3.1. L'analisi costi-efficacia	»	625
7.3.2. La valutazione di impatto ambientale	»	625
7.3.3. Fasi dell'AMC	»	628
7.4. Esempi applicativi	»	637
Bibliografia	»	641

Prefazione

Produrre una canonica prefazione, generalmente, significa premettere ai contenuti di un testo una sorta di dichiarazione finalizzata a presentare l'opera, a chiarirne gli scopi, a sottolineare i motivi che hanno suggerito l'esigenza della pubblicazione, a mettere in evidenza i metodi adottati nello sviluppo del lavoro.

Nell'introduzione al libro, tuttavia, saranno evidenziati proprio il quadro dei contenuti, le finalità che si propongono, le esigenze che si intendono soddisfare, gli studiosi ai quali è destinato, le metodologie adottate, avvertendo, perfino, che le tematiche ambientali e di inserimento architettonico dell'infrastruttura viaria sono trattate solo marginalmente, chiarendone il motivo. Se si scrivesse, pertanto, una prefazione, come prima accennato, si corrobberebbe il rischio di replicare, sia pure in parte con altre parole, la stessa introduzione.

Lo spunto per scrivere la prefazione viene fornito, invece, dal convincimento che la comunità dei ricercatori universitari debba sentire la necessità etica di trasferire sistematicamente i risultati consolidati degli studi attraverso opportuni strumenti didattici.

A tal fine è apparso utile effettuare una ricognizione nel tempo per appurare come, nel panorama della produzione didattica della predetta comunità, può collocarsi il libro che viene appena presentato.

In proposito, occorre ricordare che la nostra disciplina di base (in origine **Costruzioni Stradali**) si è sviluppata nell'alveo dell'allora matura tecnica ferroviaria. Dalla quale, al suo esordio, prese a prestito, non solo, le conoscenze acquisite in tema di costruzione della sede e delle opere d'arte, ma anche, non senza evidenti approssimazioni, le linee direttrici riguardo gli aspetti più squisitamente formali del tracciato.

In questo solco, in poco più di un ventennio, tra la fine degli anni Trenta e la fine degli anni Cinquanta, vennero elaborati e videro la luce i testi di:

- AZIMONTI I.C., **Costruzioni Stradali e Ferroviarie**;
- BOLIS B., **Progettazione e Costruzione delle Strade**;
- TOCCHETTI L., **Costruzioni di Strade, Ferrovie ed Aeroporti**;

ai quali occorre aggiungere quello pubblicato, alla fine del citato periodo, dal prof. Giuseppe Tesoriere dal titolo **La Meccanica del Terreno**.

Quest'ultimo testo, finito di stampare nel 1959, arricchito con una vastissima bibliografia, fu il primo in Italia ad occuparsi di *Geotecnica Stradale* e provvide, così, a coprire un'esigenza didattica, molto sentita, riguardante *gli ammassi terrosi, il materiale terra, il coniugio terreno-manufatti stradali* nonché *il Laboratorio Stradale*.

Con l'ausilio di tali testi, si formarono intere generazioni di ingegneri civili, i quali fornirono un contributo non piccolo alla costruzione delle autostrade italiane che, alla fine del secondo conflitto mondiale, cominciarono a realizzarsi.

In questo periodo, nel quale l'Italia stava compiendo uno sforzo enorme per dotarsi di moderne infrastrutture viarie e le nostre Università stavano riorganizzandosi, apparvero inadeguati i sussidi didattici esistenti rispetto ai compiti professionali che attendevano i nostri ingegneri civili. Al fine di superare tale inadeguatezza e stimolare l'attività di ricerca scientifica sugli aspetti più qualificanti della Materia, il prof. Giuseppe Tesoriere maturò la convinzione di scrivere un testo moderno della Disciplina, allineato alle più recenti acquisizioni in campo internazionale.

Così, nel corso degli anni Settanta, furono pubblicati i tre famosi volumi dell'opera di TESORIERE G., ***Strade, Ferrovie e Aeroporti***.

L'opera ebbe grande diffusione non solo fra gli studenti e i docenti di tutte le Università italiane ma anche fra i professionisti del settore nonché trovò posto nelle biblioteche di moltissimi uffici tecnici di Amministrazioni pubbliche e private.

Fu il primo testo che razionalizzava e sistematizzava i contenuti della Materia fino ad allora noti, che facevano riferimento alla letteratura nazionale e internazionale; fu il primo, importante tentativo di offrire, per quanto possibile e considerate le conoscenze del tempo, un'opera che rappresentava una sorta di transizione fra le *Strade* figlie delle Ferrovie e le *Strade* aventi consistenza e dignità autonoma.

Incidentalmente, appare il caso di ricordare che, in questo decennio, alla sentita ricerca di un'unità d'indirizzo nell'espletamento delle attività istituzionali e di fronte a un mondo accademico che cresceva alacramente, la Scuola d'Ingegneria Stradale seppe mettersi in discussione, stimolata dal nuovo testo, svolgendo un faticoso e appassionato dibattito, che coinvolse tutte le sedi universitarie, nel corso del quale discusse intorno alla propria identità culturale, all'analisi dei temi didattici autonomi caratterizzanti le Costruzioni Stradali, al tipo di didattica da impartire, ai temi di ricerca da affrontare, al rapporto dei docenti di Strade con le rispettive Facoltà, alla necessità di diffusione delle discipline stradali, ritenute essenziali per la formazione degli ingegneri civili, in tutti gli Atenei italiani.

Nell'anno 1977, circa cinque anni dopo la pubblicazione del primo volume di Tesoriere G., riguardante il progetto e le opere d'arte, gli ausili didattici per l'insegnamento delle nostre discipline si arricchiscono con la stampa del testo di FERRARI P. e GIANNINI F., ***Ingegneria Stradale***, vol. I, Geometria e Progetto Stradale.

Questo testo, rispetto ai precedenti, si occupa del disegno delle sole strade e approfondisce i temi concernenti il traffico motorizzato chiarendo più puntualmente la sua influenza nell'attività progettuale. La trattazione della materia si caratterizza per l'obiettivo che intende conseguire, il quale, come gli stessi Autori dichiarano, è quello di *indicare agli allievi ingegneri la via della ricerca metodologica e dell'interpretazione personale delle forme di progettazione; ai tecnici che si interrogano sulle nuove possibilità della tecnica stradale si indicano le vie dell'analisi critica e dell'indagine*.

Nell'anno 1979, a circa sei anni di distanza dalla pubblicazione del secondo volume di Tesoriere, riguardante le opere in terra e le soprastrutture, vede la luce l'altro testo di FERRARI P. e GIANNINI F., ***Ingegneria Stradale***, vol. II, Corpo Stradale e Pavimentazione, nel quale sono trattate le soprastrutture stradali, rigide e flessibili, sia sotto il profilo dei materiali che le compongono sia sotto l'aspetto del dimensionamento.

Nel 1983, dopo quattro anni dalla pubblicazione del terzo volume di Tesoriere, nel quale è trattato soltanto il tema delle "Soprastrutture Aeroportuali", TOCCHETTI A. dà alla stampa il testo ***Infrastrutture ed Impianti Aeroportuali***, il primo dedicato all'insegnamento della costruzione degli aeroporti.

Ciò accade in un periodo in cui, nel nostro Paese, l'aviazione commerciale si era sviluppata e operava in condizioni difficili, perché la rete degli aeroporti, sorta dalla trasformazione degli aeroporti militari, non era adeguata alle esigenze del traffico aereo produttivo. Le difficoltà, peraltro, erano aggravate dal fatto che i problemi di gestione e di esercizio erano subordinati alle esigenze di carattere militare.

La comparsa di questo testo suscitò, sia nel nostro Raggruppamento Disciplinare sia nell'ambito professionale, un grande interesse perché, da una parte, le Facoltà d'Ingegneria italiane avevano attivato discipline che facevano riferimento alle costruzioni aeroportuali e, dall'altra, il testo si caratterizzava per la chiarezza e per la completezza dei contenuti e, pertanto, soddisfaceva egregiamente una sentita esigenza didattica e di consultazione.

Dopo poco meno di vent'anni, durante i quali è intervenuta una crescita del *Gruppo Stradale*, non sempre ritenuta positiva da taluni, si assistette ad un risveglio di non piccolo rilievo, considerato che, nel giro di quattro anni, vennero pubblicati altri testi didattici. Infatti, nel settembre del 2002, AGOSTINACCHIO M., CIAMPA D. e OLITA S. danno alle stampe un testo dal titolo: **La Progettazione Funzionale Stradale**, Guida Pratica alla corretta applicazione del D.M. 5.11.2001.

Si tratta di un ottimo contributo col quale, attraverso un pedissequo riferimento alle nuove cogenti disposizioni, gli Autori intendono favorire una maggiore comprensione delle *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade*, le quali, redatte da una Commissione costituita da docenti universitari del settore strade e insediata dall'ex Ministero dei Lavori Pubblici, sono state, peraltro, sottoposte a dure critiche da una parte consistente del nostro mondo accademico.

Nei primi mesi del 2003, ESPOSITO T. e MAURO R. pubblicano il testo **Fondamenti di Infrastrutture Viarie** in due volumi, il primo dedicato alla Geometria Stradale e il secondo alla Progettazione Funzionale delle Strade. Viene annunciata inoltre la pubblicazione di un terzo volume che si occuperà degli elementi di base della progettistica ferroviaria. Nel primo volume viene fornita una risposta all'esigenza didattica, più volte manifestata dai docenti del settore, di disporre di un testo nel quale si definiscono con chiarezza *gli elementi fondamentali* in base ai quali procedere alla concezione e alla progettazione geometrica delle strade. La trattazione della materia (fondamenti) segue l'indirizzo riscontrabile nella letteratura tecnica anglosassone, indirizzo che, come rilevano gli Autori, venne posto, a suo tempo, da FERRARI P. e GIANNINI F. nel primo dei due volumi di cui si è detto.

Nel secondo volume, di notevole rilievo appaiono i contenuti del capitolo dedicato alla sicurezza stradale.

Nel giugno del 2004, ANNUNZIATA F., CONI M., MALTINTI F., PINNA F. e PORTAS S. pubblicano il testo **Progettazione Stradale Integrata**, nel quale una particolare attenzione viene riservata al tema della sicurezza stradale e a quello dell'inserimento dell'arteria nel contesto ambientale. L'impostazione e l'organizzazione del libro rispecchia la concezione secondo cui la progettazione, la realizzazione, l'esercizio e la manutenzione, *pur essendo fasi sostanzialmente diverse della vita di una infrastruttura, vanno riguardate come tappe successive, integrate in un unico disegno generale, che è quello della piena fruizione di un bene della collettività*, precisando che tale libro non intende essere un tradizionale libro di testo quanto piuttosto l'esposizione di alcuni argomenti, secondo gli Autori, non compiutamente trattati nei testi disciplinari in quel momento disponibili.

Nel marzo 2006, TOCCHETTI A. pubblica il testo **Infrastrutture aeroportuali**, nel quale

sono trattati i criteri e le tecniche di progettazione e di gestione degli aeroporti, comprendendo anche nozioni sull'esercizio degli stessi e sull'impatto ambientale da essi generato.

Nell'agosto del 2006, infine, DI MASCIO P., DOMENICHINI L. e RANZO A. pubblicano il libro ***Infrastrutture Aeroportuali***, nel quale è raccolto l'insieme del lavoro didattico svolto, a partire dal 1983, dai tre Autori, durante i periodi nei quali sono stati docenti della disciplina.

L'obiettivo del libro è quello dichiarato di offrire agli studiosi *un percorso di conoscenza delle maggiori, diverse problematiche che occorre affrontare nella progettazione e nella gestione di un aeroporto*.

Il libro fornisce un fondamentale contributo allo svolgimento di una qualificata attività didattica nel campo delle infrastrutture aeroportuali.

Fin qui la ricognizione della quale si è detto, che non comprende le numerose pubblicazioni di tipo monografico dedicate a particolari aspetti delle discipline stradali, ricognizione che, in qualche modo, fornisce contezza della produzione di sussidi didattici che i ricercatori del settore hanno reso disponibili in un arco temporale di circa settant'anni, con risultati che, in generale, possono definirsi più che adeguati alle esigenze di formazione dei fruitori.

Oggi, a questo panorama, si associa il volume che viene presentato, recante il titolo ***La progettazione stradale: dalle ricerche al disegno della strada***, composto di sette capitoli, ciascuno dei quali è stato redatto da uno o più dei suoi Autori.

Il libro viene proposto all'attenzione e all'esame degli studiosi della disciplina, nella precisazione che esso non è stato redatto in quanto tradizionale libro di testo, quanto piuttosto per esporre alcuni argomenti di interesse del mondo della ricerca e del mondo professionale per la progettazione di nuove infrastrutture e la gestione di quelle esistenti.

Francesco Annunziata

Introduzione

Il testo nasce dall'ovvio convincimento che le discipline d'ingegneria sono in continuo divenire grazie alle attività di ricerca che la comunità scientifica conduce continuamente e sistematicamente sui differenti temi. Ne discende che, nel tempo, capitoli dei testi didattici, anche dei più pregevoli, possono apparire, sia pure in parte, superati.

La ricerca che si conduce, in particolare nelle Università, non può che tradursi nel trasferimento agli studenti, attraverso la didattica, dei risultati consolidati degli studi compiuti, al fine di formare tecnici capaci di risolvere i problemi che si presentano, mediante l'utilizzo di conoscenze adeguate ed aggiornate.

La progettazione delle infrastrutture viarie richiede, nei diversi elementi che costituiscono la rete e/o la singola via, questo continuo aggiornamento conoscitivo.

Per corrispondere alle richieste che provengono, in particolare, dagli stessi studenti di ingegneria civile, dell'ambiente e del territorio, edile ed edile-architettura, è stato redatto il presente testo. Esso nasce anche dalla convinzione che la comunità dei ricercatori universitari debba sentire la necessità etica di trasferire sistematicamente i risultati consolidati degli studi attraverso opportuni strumenti didattici, senza che il singolo studente, o tecnico incaricato della progettazione di una strada, per esempio, debba cercare in testi e/o pubblicazioni, anche internazionali, i concetti e le tecniche aggiornati, necessari per la soluzione del problema che gli è stato posto.

Tra le finalità del testo vi è anche quella di riprendere e commentare le differenti normative italiane di progettazione, eventualmente ancora in definizione, allo scopo di evidenziarne gli assunti principali e gli eventuali limiti e di suggerire possibili integrazioni che possano essere ritenute utili anche nelle attività di adeguamento e di aggiornamento della stessa normativa.

Si ritiene opportuno e corrispondente alle finalità proprie di questo libro avanzare all'attenzione della comunità scientifica, dei progettisti e degli stessi studenti alcune riflessioni, anche se non saranno approfondite in un capitolo specifico. Si può quindi prendere l'avvio dalla constatazione che esiste un consenso generalizzato in merito ai differenti obiettivi della progettazione e/o della riqualificazione di una rete viaria, o anche solo dei singoli itinerari che ne fanno parte. Essi sono:

- la realizzazione di condizioni di sicurezza della circolazione, assicurando determinati livelli di servizio;
- il miglioramento delle condizioni di accessibilità territoriale;
- il conferimento alla rete stessa di caratteristiche di connettività nell'ambito del sistema dei trasporti di cui è parte;
- il concorrere ad una riorganizzazione territoriale finalizzata ad obiettivi di riequilibrio dei sistemi urbani e dei servizi puntuali di uso collettivo;

- l’adeguamento delle reti viarie nelle finalità proprie della protezione civile, di modo che siano sempre garantiti i collegamenti per una data regione e/o che attraversino la stessa.

Le priorità tra i differenti interventi che realizzano l’insieme, o parte, degli obiettivi considerati terranno conto:

- del ruolo attribuito a ciascun itinerario nel contesto della rete e della sua efficienza, sotto il profilo del servizio reso, della sicurezza d’esercizio e delle criticità ambientali che lo caratterizzano;
- della tipologia degli interventi di adeguamento necessari, al fine di valutare i programmi nel loro complesso, gestendo quindi azioni organiche che possano assicurare significative economie di scala nel rispetto di omogenei standard prestazionali;
- della dinamica dei processi in atto, da cui dipendono le leggi di obsolescenza funzionale, per individuare l’orizzonte temporale d’intervento che garantisca il contenimento dei costi tramite il recupero delle infrastrutture esistenti.

In merito alla progettazione di un tracciato stradale la legge n. 109, 11 febbraio 1994, “Legge quadro in materia di lavori pubblici”, precisa che il progetto si articola, nel rispetto dei vincoli esistenti, preventivamente accertati, e dei limiti di spesa prestabiliti, secondo tre livelli di successivi approfondimenti tecnici, in progetto preliminare, definitivo ed esecutivo, in modo da assicurare:

- la qualità dell’opera e la rispondenza alle finalità relative;
- la conformità alle norme ambientali ed urbanistiche;
- il soddisfacimento dei requisiti essenziali, definiti dal quadro normativo nazionale e comunitario.

La progettazione è dunque un procedimento iterativo che subordina le scelte tecniche, anche di classificazione dei differenti itinerari costituenti la rete, alla verifica degli effetti indotti, al fine di perseguire il miglior compromesso tra esigenze funzionali, economiche ed ambientali, atto a garantire il miglior bilancio d’impatto.

È certamente patrimonio della moderna cultura progettuale che la strada debba essere sicura, debba garantire adeguati livelli di servizio per tutta la sua vita utile, e debba essere sostenibile dal territorio attraversato. Il risultato del percorso progettuale è che la strada, con i suoi volumi, le sue opere d’arte, il suo stesso tracciato, diventi ambiente nell’ambiente preesistente, ne sia elemento di valorizzazione, e anche di arricchimento. La progettazione integrata, nel suo divenire lungo il percorso progettuale, nel disegnare la strada ai differenti livelli di approfondimento, anche quando si tratti di adeguamenti di strade esistenti, nella sua capacità di coinvolgimento e di convincimento delle comunità interessate, appare una sicura metodologia quando si vogliono armonizzare natura e manufatti, meccanica e sicurezza, costi e benefici, estetica e statica.

In proposito, da tempo ci si va interrogando se tra gli obiettivi della progettazione di una strada possa essere considerata la sua qualità formale, se la strada debba essere considerata un “oggetto architettonico”, oppure se gli obiettivi siano quelli di tipo prestazionale (quelli sopra elencati), e quindi la sua sostenibilità ambientale, la sua qualità formale debbano essere condizioni da rispettare nel corso della progettazione.

Una possibile risposta a queste domande può provenire dall’immagine della strada che è percepita dagli utenti, distinguendo comunque la strada urbana da quella extraurbana. In riferimento alle relazioni tra strada e utente è nota l’importanza del comportamento

del conducente in relazione alle caratteristiche geometriche e di progetto: nell'ultimo decennio si sono intensificati gli studi circa le variazioni del comportamento di guida in relazione all'ambiente stradale. A tal proposito, la letteratura nazionale ed internazionale è ricca di studi e di modelli che considerano in primis il rapporto suddetto e che forniscono ottimi spunti di riflessione sull'importanza del ruolo assunto, in fase progettuale, dall'ambiente stradale. Quest'ultimo comprende tutto ciò che, circondando il tracciato, è percepibile dal conducente e quindi ne influenza la condotta. Inoltre, l'ambiente stradale può influenzare non solo la guida, ma anche la scelta di un itinerario rispetto ad un altro.

Infatti, a seconda delle proprie esigenze, l'automobilista, avendo a disposizione diversi archi colleganti gli stessi nodi, esprime preferenze che lo conducono a prediligere un itinerario rispetto ad un altro. Spesso ciò è associato a tempi di percorrenza inferiori, maggior comfort di guida, tragitto più piacevole, etc. Questa scelta ha ovviamente ripercussioni più o meno importanti sul territorio attraversato, sia in ambito extraurbano che urbano. Per quanto concerne quest'ultimo diversi interessanti spunti di riflessione possono essere sviluppati, in riferimento alle differenti tipologie di utenti, alla complessità dell'ambiente attraversato, alle peculiarità urbanistiche, architettoniche e, non meno importanti, socio-economiche e culturali.

In ambiente urbano la strada è avvertita dall'automobilista in maniera differente piuttosto che dal pedone, la cui percezione varia anche in relazione alla fascia di età di appartenenza, al livello culturale, al ruolo assunto (un turista ha una percezione diversa rispetto a colui che ivi abita, lavora o comunque vi passa abitualmente). Riflettendo sulle strade delle nostre città, in che termini vengono percepite? Per rispondere a questa domanda è necessario calarsi nei panni dell'automobilista, del pedone, dell'osservatore "in quota z".

L'automobilista probabilmente valuta la strada in relazione ai materiali utilizzati nelle pavimentazioni e allo stato di degrado di queste ultime, al livello di congestione, alla sicurezza intrinseca, al livello di illuminazione, al comfort di guida in senso lato e quindi al carico di lavoro mentale necessario per percorrerla. Quest'ultimo è sentito anche quando l'ambiente circostante è gradevole e linearmente ed armonicamente vario, perché l'attenzione del conducente cerca di spostarsi verso l'esterno, e può farlo in sicurezza solo se le condizioni del traffico, le caratteristiche della sezione stradale, lo stato di manutenzione delle pavimentazioni glielo permettono.

Occorre non sottovalutare il livello di rischio percepito. È infatti necessario prendere in considerazione l'utente che non sempre si lascia "affascinare" dall'ambiente che circonda la strada e che quindi potrebbe, a fronte della percezione di un'eccessiva sicurezza, assumere atteggiamenti di guida e velocità non rapportabili all'ambito di riferimento.

Gli utenti deboli, i ciclisti e i pedoni, hanno una diversa percezione della strada, in relazione alle differenti esigenze, alle inferiori velocità di percorrenza e al livello di rischio percepito. Il ciclista ha meno possibilità di distrarsi sull'ambiente esterno, viaggia in una condizione di equilibrio che richiede maggiore attenzione. Egli avverte in maniera più importante il degrado delle pavimentazioni, i coni d'ombra, le intersezioni gestite in maniera poco funzionale o, comunque, non studiate anche in riferimento alle esigenze di tali utenti, etc. Il pedone, invece, segue la strada percorrendone le estremità laterali o le zone centrali, è più sensibile ai particolari ed è anch'egli profondamente disturbato dalle situazioni di degrado, anche perché le vive con maggior disagio, le vive più a lungo. Per

il pedone, ad esempio, il degrado delle pavimentazioni dei percorsi a lui dedicati determina disagi più o meno gravi, spesso inversamente proporzionali alle capacità motorie dell'interessato. Questi percepisce diversamente anche gli elementi di arredo della strada, che spesso determinano la predilezione di una passeggiata rispetto ad un altro percorso, perché più piacevole, più rilassante, più sicura (pensiamo, per esempio, alla presenza e alla tipologia degli impianti di illuminazione, del verde, etc.). Infine, l'osservatore statico, a "quota z", se in posizione privilegiata rispetto allo sviluppo di un'arteria urbana, avverte in maniera diversa l'armonia tra ambiente stradale e abitato, spesso in maniera più o meno distaccata e meno coinvolta. Egli certo non si preoccuperà delle ormaie, bensì percepirà gli elementi di arredo, magari quelli fisicamente più importanti, come il verde, gli impianti di illuminazione, etc.

Come è possibile osservare in ambiente urbano, quando si parla di qualità della strada, assume un'importanza notevole il rapporto tra spazio e tempo: velocità, ma non solo. Pertanto, gli interventi in ambito urbano, maggiormente vincolato, devono essere finalizzati all'analisi dei materiali utilizzati, delle opere di arredo, di quelle finalizzate alla sicurezza della circolazione, come lo studio delle rotatorie, dei sistemi di moderazione del traffico, degli impianti di illuminazione, etc. La qualità della strada in area urbana è in stretto rapporto alle funzioni svolte, alla composizione della corrente veicolare, alla presenza di vincoli storico-archeologici, urbanistici. Con riferimento a quanto detto, la piazza, ad esempio, deve essere vista come luogo di incontro, non come parcheggio o slargo, o comunque "non luogo", ove regolamentare le intersezioni tra i flussi veicolari. Gli impianti, gli arredi, i sistemi di mitigazione del traffico devono essere studiati in modo tale da essere in armonia con l'ambiente nel quale sono ubicati: essi non devono essere semplicemente "a norma".

È necessario in fase d'intervento non trascurare che in determinate aree urbane la strada è anche l'unico "luogo pubblico", spazio riservato alla collettività.

L'ambiente extraurbano, invece, forse perché per certi aspetti meno vincolato, presenta problematiche più fini e più difficilmente avvertibili e quindi spesso meno risolte. Quando la strada percorre l'ambiente extraurbano è necessario fare diverse analisi sui sistemi attraversati. Uno stesso tracciato spesso varca territori diversificati. In quest'ambito il tracciato planimetrico è in primis studiato in relazione, oltre che all'andamento del terreno, al comportamento del conducente. Il tracciato planoaltimetrico è progettato in modo tale da far coincidere quanto più possibile il comportamento di guida effettivamente sviluppato con quanto previsto in fase progettuale. Il fine ultimo è la sicurezza, che deve essere sempre garantita qualunque sia la scelta progettuale adottata.

Sicurezza però è anche garanzia di spostamento; un evento straordinario come ad esempio un'alluvione non può e non deve isolare un centro abitato. Ecco che nasce l'esigenza di costruire in armonia con la natura, con l'ambiente attraversato. La strada, inoltre, non può essere causa di impoverimento delle risorse della flora e della fauna, deve rispettare e garantire il mantenimento delle reti ecologiche, evitando di essere la causa di ulteriori frammentazioni. Parlando di ambiente però è doveroso riferirsi non solo alla sua accezione naturale ma deve essere inteso l'ambiente in senso lato: entità che la strada non deve deturpare, al più riqualificare, sia esso un ambiente naturale, storico, archeologico, ma anche socio-culturale. In questo modo la strada è "oggetto architettonico". Garantisce un servizio, contestualizzata con il territorio attraversato, non lo disturba, si inserisce e, in qualche caso, ne favorisce la conoscenza ai più. Rispettare l'ambiente non

significa inserirlo in un'ampolla di vetro bensì vivere in armonia con esso, anche se spesso ciò può significare dover affrontare, per l'esecuzione di determinate opere, relativamente elevati impegni economici, che però garantiscono il mantenimento della risorsa. Ma in che modo il tracciato stradale deve svolgersi così da offrire "squarci" ambientali confortevoli, che rendano psicologicamente "piacevole" il percorrere la strada?

Certamente un tracciato stradale, sia esso in area urbana o extraurbana, è un "unicum" che va studiato in quanto tale in relazione all'ambiente nel quale si sviluppa seguendo criteri connessi alle funzioni dell'arteria, alla composizione della corrente veicolare, alla rete di appartenenza, alla scelta dei materiali, alla qualità dell'ambiente naturale attraversato, alla presenza o meno di vincoli storico-archeologici, urbanistici, alle esigenze socio-culturali del territorio attraversato. La valutazione di impatto ambientale tiene conto in linea di massima degli aspetti suddetti, ma in che modo la qualità architettonica della strada è quantificabile?

La progettazione stradale è un procedimento iterativo: si arriva alla soluzione attraverso tentativi e studi via via più approfonditi, escludendo che il risultato del progetto sia un prodotto da verificare alla conclusione dell'iter che ha condotto alla definizione del tracciato plano-altimetrico e quindi alla stima del suo costo.

La valutazione ambientale e quella "formale" sono parte del progetto e possono quindi intendersi quali verifiche intermedie, di livello sempre più approfondito nella stesura delle tre fasi di progettazione.

L'obiettivo della progettazione non può essere anche distintamente la valenza ambientale e/o "formale". Può essere invece un complesso di obiettivi di tipo prestazionale, che sia raggiunto da un tracciato sostenibile dal territorio attraversato e formalmente congruente con il contesto.

Quindi la strada deve essere progettata sempre in riferimento ai propri utenti, in relazione al reale comportamento di guida dei conducenti, deve raffrontarsi con il contesto ambientale, socio-economico e culturale, il tutto nel rispetto delle normative vigenti.

Il libro è articolato su quattro temi fondamentali:

- la normativa per l'adeguamento delle strade esistenti;
- la progettazione delle strade in area urbana;
- la progettazione, la costruzione e la manutenzione dei solidi e delle sovrastrutture per le differenti infrastrutture di trasporto;
- l'analisi di redditività degli investimenti.

Le tematiche prettamente ambientali e di inserimento architettonico dell'infrastruttura viaria sono qui trattate solo marginalmente in ordine al fatto che un argomento sì vasto avrebbe trovato nelle poche pagine di un capitolo una trattazione troppo superficiale non di ausilio a progettisti, ricercatori e studenti.

Il lavoro è stato coordinato, nel suo complesso, dal prof. ing. Francesco Annunziata, ordinario del settore scientifico disciplinare "Strade, Ferrovie ed Aeroporti" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Cagliari. Le singole parti sono state redatte come segue.

Autori del capitolo 1 sono i dott. ingg. Francesca Maltinti e Daniela Melis, rispettivamente, ricercatore del s.s.d. "Strade, Ferrovie ed Aeroporti" e dottorando di ricerca in Ingegneria del Territorio, ed il prof. ing. F. Annunziata.

Il capitolo 2 è stato redatto dai dott. ingg. Emanuela Cecere, dottore di ricerca in Tecnica ed Economia dei Trasporti, e Francesca Puggioni, dottorando di ricerca in Ingegneria del

Territorio: l'ing. E. Cecere ha curato l'impostazione del capitolo, ne ha guidato la redazione ed ha partecipato alla trattazione degli argomenti compresi.

Il capitolo 3 è stato redatto dal dott. ing. F. Maltinti.

Il capitolo 4 è stato redatto dal prof. ing. Mauro Coni, associato del s.s.d. "Strade, Ferrovie ed Aeroporti", e dal dott. ing. Silvia Portas, dottore di ricerca in Ingegneria del Territorio. In particolare, il prof. M. Coni ha curato l'impostazione del capitolo.

I capitoli 5 e 6 sono stati redatti dal dott. ing. Francesco Pinna, ricercatore confermato del s.s.d. "Strade, Ferrovie ed Aeroporti" e dal dott. ing. Salvatore Pinna, funzionario tecnico dell'Assessorato della Difesa dell'Ambiente – Regione Autonoma della Sardegna: F. Pinna ne ha curato l'impostazione e ne ha coordinato la stesura; S. Pinna ha partecipato attivamente alla trattazione degli argomenti svolti, curando, in particolare, l'organizzazione di una rete viaria urbana nell'obiettivo della sicurezza della circolazione, con specifica attenzione alle "utenze deboli".

Il capitolo 7 è stato redatto dal dott. ing. E. Cecere.

Infine, si ringraziano i dott. ingg. Daniela Melis e Claudia Piras, dottorande di ricerca di Ingegneria del Territorio, presso la Facoltà di Ingegneria-Università degli Studi di Cagliari, per la preziosa collaborazione nel curare l'impostazione editoriale del libro.

Il coordinatore
prof. ing. F. Annunziata

4. LA PROGETTAZIONE E LA MANUTENZIONE DELLE SOVRASTRUTTURE PER LE DIFFERENTI INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO

Mauro Coni, Silvia Portas

4.1. Introduzione

4.1.1. Generalità

L'esecuzione e la manutenzione delle sovrastrutture riveste una rilevante dimensione economica e sociale sulla sicurezza e sulla mobilità di una nazione. La loro semplicità formale, i materiali utilizzati e le funzioni che svolgono le fanno apparire come opere semplici alle quali tuttavia vengono richieste prestazioni e durabilità notevoli. Ciò ha condotto a una successione di metodologie per il loro dimensionamento e per la definizione delle migliori strategie di manutenzione e gestione. Recentemente nell'ambito del NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) promosso dal TRB (*Transportation Research Board*) statunitense molti dei metodi e delle procedure sviluppate in ambito internazionale sono state implementate in una guida progettuale che rappresenta lo stato dell'arte internazionale "*Guide for the Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*". Con riferimento anche a tale documento e nell'intento di ricondurre le tecniche e le metodologie diffuse nel nostro Paese in un più ampio inquadramento generale, in questo capitolo verranno dapprima illustrati i parametri di progetto e le principali caratteristiche dei materiali utilizzati nelle infrastrutture di trasporto, con particolare riferimento agli effetti che l'ambiente ha sulle prestazioni dei materiali legati e non legati. Successivamente verranno analizzati i carichi che sollecitano le differenti pavimentazioni di impiego stradale ed aeroportuale, e le specificità delle sovrastrutture stradali in campo urbano. Dopo avere esposto i principi base per la valutazione delle sovrastrutture esistenti e la loro riabilitazione saranno illustrati i criteri di dimensionamento e le procedure progettuali per la loro verifica.

Il principale obiettivo degli studi in corso, è quello di rendere disponibile ai professionisti del settore stradale strumenti e metodi progettuali di immediato impie-

go pratico per il dimensionamento e l'adeguamento delle sovrastrutture, sulla base di principi razionali. Tale obiettivo ha prodotto software computazionali destinati a diffondersi rapidamente tra i tecnici e i professionisti, fondati e calibrati su ampie indagini condotte in Europa e negli Stati Uniti. Tali strumenti agevolano in modo notevole le verifiche progettuali ma non possono completamente sostituirsi alle analisi e ai riscontri sperimentali più tradizionali, che fanno parte del bagaglio culturale degli operatori del settore. Per il loro utilizzo il progettista deve esplicitare sia le condizioni del sito (traffico, clima, sottofondo, stato delle pavimentazioni da adeguare) sia le condizioni costruttive, nonché ipotizzare differenti soluzioni e strategie economiche.

La procedura prosegue con la valutazione delle prestazioni e la previsione dei potenziali degradi. Se la soluzione individuata non soddisfa i criteri prestazionali la procedura viene iterata finché il risultato diviene positivo. Perciò, il progettista è completamente coinvolto nel processo progettuale e può agevolmente individuare e introdurre differenti caratteristiche della geometria e dei materiali nelle condizioni prevalenti del sito.

Questo approccio rende possibile ottimizzare la progettazione e conseguire maggiori affidabilità per evitare l'instaurarsi e il progredire degli ammaloramenti.

Tabella 4.1. Consistenza della rete stradale europea

Paesi europei	Estensione	Abitanti/territorio	Strade/territorio	Strade/abitanti	Veicoli/strade	Veicoli/abitanti
	[10 ³ km]	[ab/km ²]	[km/km ²]	[km/10 ³ ab]	[n. veicoli/km]	[n. veicoli/10 ³ ab]
Austria	111	93	1.32	1420	32.9	468
Belgio	155	332	5.09	1534	29.4	450
Danimarca	72	121	1.67	1381	27.0	373
Finlandia	77	15	0.23	1533	27.8	426
Francia	923	104	1.70	1631	31.9	520
Germania	499	228	1.40	613	85.3	523
Irlanda	92	51	1.31	2621	11.3	295
Italia	306	189	1.02	535	101.5	543
Norvegia	91	13	0.28	2117	21.8	462
Paesi Bassi	106	446	2.60	714	59.6	425
Portogallo	35	105	0.39	369	86.0	317
Regno Unito	366	246	1.59	646	74.0	478
Spagna	333	74	0.67	911	48.9	446
Svezia	99	21	0.22	1138	39.3	447
Svizzera	73	169	1.76	1041	47.2	491
Ungheria	30	111	0.33	293	82.9	243

Tabella 4.2. Indici della dotazione infrastrutturale italiana

Dati di riferimento	Anno					
	1950	1960	1970	1980	1990	1995
Autostrade [km]	-	1.169	3.913	5.960	6.193	6.396
Statali [km]	21.546	25.457	42.444	44.812	46.247	44.766
Provinciali [km]	41.639	47.582	91.311	101.521	109.361	113.063
Comunali extraurbane [km]	107.985	108.546	149.079	141.666	141.666	141.666
Totale strade [km]	171.150	182.751	286.747	293.699	303.467	305.811
Abitanti	47.159	49.904	53.745	56.336	56.765	57.203
Veicoli [n. · 10 ³]	1.365	5.767	12.705	17.655	33.279	38.681
km strade/10 ³ km ² di territorio	568	607	951	974	1.007	1.015
km strade/10 ³ abitanti	363	366	533	521	534	635
n. veicoli/km strade	8	32	44	601	110	126
n. veicoli/10 ³ abitanti	29	116	236	313	586	676

L'entità raggiunta dal trasporto su strada fornisce le dimensioni del fenomeno e permette di valutare le implicazioni economiche di un efficiente, sicuro e durevole sistema di superfici viarie.

La rete viaria italiana ha raggiunto i 310.000 km. Dal 1960 a oggi il numero di veicoli per chilometro è quadruplicato. Le percentuali di veicoli commerciali sono triplicate rispetto al 1970 e crescono con un tasso annuo del 5%.

Oltre ai costi di costruzione occorre considerare che le pavimentazioni si deteriorano sotto l'azione dei carichi pesanti e degli agenti atmosferici (temperature, umidità, gelo, precipitazioni, irraggiamento, etc.), perciò devono essere mante-

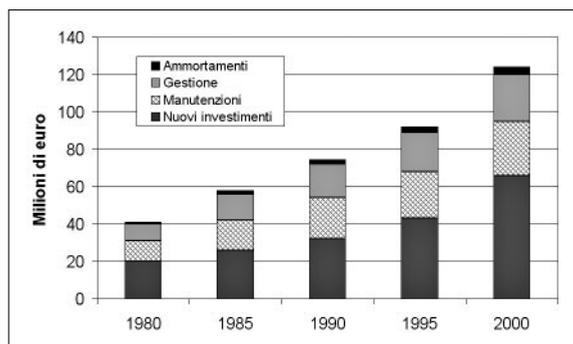


Figura 4.1. Investimenti statunitensi sulla rete stradale dal 1980 al 2000

nute e migliorate regolarmente con ulteriori significativi investimenti. La Figura 4.1 illustra l'entità e l'incremento degli investimenti statunitensi dal 1980 al 2000.

Negli USA l'ammontare complessivo degli investimenti stradali nel 2000 è stato di 106.300 M€, con un incremento del 203% rispetto al 1960 e un incremento medio annuo maggiore del 10%. Nel 2000 l'esborso complessivo è stato di 82.100 M€, di cui il 10.5% per nuove strade extraurbane principali e il 42.6% per il miglioramento della rete esistente. La restante parte, pari circa alla metà degli investimenti, riguarda i lavori relativi alle sovrastrutture.

La Tabella 4.3 mostra gli investimenti nel 2005 sulle strade statali italiane da parte dell'ANAS.

Tabella 4.3. Interventi ANAS in Italia durante il 2005

Interventi ANAS nel 2005	M€
Barriere di sicurezza (manutenzione e nuova installazione)	47,9
Impianti (manutenzione e nuova installazione)	13,9
Infomobility (manutenzione e nuova installazione)	5,3
Manutenzione opere d'arte	22,9
Manutenzione segnaletica	17
Manutenzione sovrastrutture	89,6
Ripristino, consolidamento, protezione corpo stradale	10,7
Rivestimenti gallerie e barriere acustiche	9,4
Nuove infrastrutture, svincoli	1730,6
TOTALE	1947,3

L'elevato impegno economico giustifica ampiamente la continua ricerca di migliori strategie progettuali per l'ottimizzazione dei pesanti oneri finanziari. L'individuazione di procedure e metodi che permettano di ridurre, anche di soli pochi punti percentuali, il costo delle pavimentazioni può essere tradotto in parecchie decine di milioni di euro ogni anno a favore di nuove opere, del miglioramento della sicurezza e delle prestazioni di quelle esistenti.

4.1.2. Principi meccanicistici ed empirici delle procedure progettuali

L'esigenza di aggiornare continuamente i paradigmi progettuali deve essere ricercata nell'includere, all'interno delle procedure, nuovi e più approfonditi aspetti dei fenomeni fisici che interessano i materiali stradali e la loro risposta strutturale e ambientale. In particolare è necessario tenere conto dei seguenti fenomeni:

- i volumi di traffico sono cresciuti in modo esponenziale (circa 15-20 volte negli ultimi 40 anni). Se negli anni '70 il dimensionamento delle strade statali principali in qualche caso arrivava a considerare un traffico pesante cumu-

lato durante la vita utile di circa 10-15 milioni di veicoli, si è arrivati in tempi recenti a dimensionare sovrastrutture per oltre 150 milioni di veicoli pesanti. Ciò è dovuto anche all'incremento della vita utile imposta in fase progettuale che è passata da valori medi di 20 anni a più di 30 e 40 anni, il che consente di dilazionare nel tempo pesanti interventi di manutenzione straordinaria o di riqualificazione e potenziamento di importanti arterie altamente trafficate quali, ad esempio, i tronchi terminali delle strade extraurbane o gli assi di circonvallazione urbana. Molti metodi di dimensionamento sono stati calibrati in sezioni stradali di controllo con al più un milione di assi cumulati. Attualmente tale traffico può interessare una sovrastruttura già nei primissimi anni di esercizio. Sono spesso necessarie forzate estrapolazioni delle equazioni e dei metodi validati in campi differenti;

- l'affidabilità è un aspetto che solo di recente inizia a diffondersi tra progettisti e operatori del settore. Il concetto introdotto dall'*AASHTO Guide* (*AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials*) era piuttosto grossolano e basato su dati empirici e molto limitati, in particolare in relazione al traffico pesante. L'incremento della affidabilità progettuale diviene quindi un importante fattore nel dimensionamento e nella valutazione economica;
- le condizioni climatiche sono molto spesso trascurate o quantomeno sottovalutate negli effetti che hanno sulle sovrastrutture. Anche in questo caso, le procedure di dimensionamento risultano valide nell'ambito delle condizioni ambientali in cui si trovavano le sezioni di controllo per la calibrazione delle relazioni matematiche di dimensionamento e, dunque, difficilmente possono essere estese in altri luoghi senza le opportune verifiche. Il miglioramento dell'affidabilità e delle prestazioni è fortemente influenzato dall'introduzione degli aspetti meteo-climatici che direttamente possono interessare l'opera stradale;
- non tutte le tipologie di sottofondi sono state indagate. Generalmente il sottofondo viene caratterizzato con riferimento a prove di tipo statico piuttosto che dinamico e lo stesso modulo resiliente, generalmente utilizzato per la caratterizzazione elastica, tiene conto solo del comportamento generale dei materiali. Anche in questo caso una sua più esaustiva conoscenza incrementa l'affidabilità e le prestazioni di progetto;
- molte carenze devono essere superate anche per quanto concerne la validazione delle procedure analitiche per i materiali impiegati negli strati di base e superficiali. Recentemente sono stati introdotti nuovi materiali che non sono stati completamente studiati e considerati nelle procedure di dimensionamento (ad esempio fibrorinforzi dei materiali cementizi e bituminosi);
- i limiti nella caratterizzazione dei carichi effettivamente trasmessi dai mezzi pesanti sono una delle cause che limitano la qualità di tutti i metodi di dimensionamento. Non vengono generalmente considerate le tipologie di sospensioni, la confi-

- gurazione degli assi, le tipologie di pneumatici e le differenti pressioni di gonfiaggio;
- le carenze progettuali, le disomogeneità costruttive e la mancanza dei drenaggi probabilmente sono tra le principali cause che riducono l'affidabilità del processo di dimensionamento. Occorre che tali aspetti vengano attentamente considerati già nella fase progettuale, riferendosi alle specifiche modalità costruttive, ai mezzi d'opera e ai sistemi di drenaggio utilizzati e specifici del contesto regionale e ambientale;
 - un aspetto che deve essere considerato riguarda il fatto che le sezioni di prova sono monitorate per un numero di anni troppo ridotto rispetto ai tempi di esercizio della strada. Ad esempio, le estese indagini condotte nell'ambito dell'*AASHTO Road Test* sono state condotte su un periodo di 2 anni, il che riduce l'affidabilità relativamente agli effetti della fatica e dell'invecchiamento dei materiali;
 - molte pavimentazioni devono essere riabilite per motivi che non sono direttamente connessi allo spessore degli strati (ormaiamento, fessurazioni termiche, sgranamenti, etc), pertanto i metodi di dimensionamento devono essere implementati per tener conto di tutti i possibili meccanismi di rottura, stati limiti ultimi e di esercizio anche indipendenti dagli spessori assegnati agli strati;
 - è necessario definire meglio il concetto di *affidabilità* attualmente introdotto in molti metodi come un fattore moltiplicativo necessario a garantire un dato livello prefissato di successo. Tale fattore può tradursi in uno spessore eccessivo che non può essere garantito con riferimento alle comuni progettazioni delle sovrastrutture.

La misura principale delle prestazioni della pavimentazione è stata storicamente la funzionalità superficiale, dominata dalle caratteristiche del profilo longitudinale. Tuttavia, in molti casi, gli enti gestori hanno constatato che i tempi di intervento ottimali possono essere connessi ad altri fattori (fessurazioni, ormaiamento, collasso dei giunti, etc.); risulta pertanto particolarmente utile introdurre gli stessi indicatori di prestazione, impiegati all'interno delle procedure di gestione e manutenzione, già nella fase di dimensionamento iniziale.

Le più recenti strategie di dimensionamento non distinguono in maniera netta, come accadeva in passato, tra metodi empirici e razionali. Esse, cogliendo i vantaggi di entrambi, integrano in un unico complesso di regole il progetto, la verifica e la previsione dei degradi delle pavimentazioni in un'ottica meccanicistica-empirica. Questa nuova filosofia progettuale, accanto a metodi di calcolo estremamente sofisticati e ben riconducibili alla meccanica del continuo, prevede il ricorso ai risultati di tronchi stradali sperimentali e alla loro interpretazione secondo regressioni statistiche.

L'approccio prevede tre livelli gerarchici degli input di progetto e permette al progettista di dosare l'impegno progettuale all'importanza dello stesso. Ulteriore vantaggio è quello che future procedure di analisi possono essere introdotte senza modificare l'impostazione complessiva.