

Federico Boccalaro

Difesa delle coste e ingegneria naturalistica

Manuale di ripristino degli habitat lagunari,
dunari, litoranei e marini

Nel CD allegato: capitolo "controllo di qualità", glossario,
approfondimenti e rassegna fotografica in pdf



Dario Flaccovio Editore



COLLANA SIGEA
DI GEOLOGIA
AMBIENTALE



Compatibile Windows

[Scheda sul sito >](#)



- Idrodinamismo marino e geomorfologia costiera ✓
- Scogliere radenti e foranee, recupero e ripristino, ripascimenti e spiagge artificiali ✓
- Ecosistema costiero: la vegetazione dei litorali sabbiosi e salati, rocciosi, la macchia ✓
- Progettazione di interventi e monitoraggio delle opere costiere, ecosistema marino ✓

Federico Boccalaro

DIFESA DELLE COSTE E INGEGNERIA NATURALISTICA

Manuale di ripristino degli habitat lagunari, dunari, litoranei e marini



Dario Flaccovio Editore

*A Carla e Giulia
per un Mediterraneo a misura di mito*

Ἡμος δ' ἠριγενεία φανή ροδοδακτύλος Ἥως,
καὶ τότε γῶν ἀγορήν θεμενός μετὰ πασίν εἶπεν:
"... Εἶδον γάρ σκοπιῆν ἐς παιπαλοέσσαν ἀνέλθων
νῆσον, τὴν περὶ πόντος ἀπειρίτος ἐστεφανώται.
Αὕτη δὲ χθαμαλή κεῖται: κάπνον δ' ἐνὶ μέσση
ἐδρακὸν ὀφθαλμοῖσι διὰ δρυμὰ πυκνὰ καὶ ὕλην".
(Omero, *Odissea*, X "Circe" 187-197)

*Ma come, figlia di luce, apparve l'Aurora dita rosate,
allora io, fatta adunanza, parlai in mezzo a tutti:
"... Vidi, infatti, salito su una cima rocciosa,
l'isola, che intorno il mare infinito corona.
E un'isola bassa: un fumo nel centro
ho scorto con gli occhi tra i fitti querceti e la macchia".
(Trad. Rosa Calzecchi Onesti)*



Federico Boccalaro

DIFESA DELLE COSTE E INGEGNERIA NATURALISTICA

Manuale di ripristino degli habitat lagunari, dunari, litoranei e marini

ISBN 978-88-579-0109-1

© 2012 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: febbraio 2012

Boccalaro, Federico <1956->

Difesa delle coste e ingegneria naturalistica : manuale di ripristino degli habitat lagunari, dunari, litoranei e marini / Federico Boccalaro. - Palermo : D. Flaccovio, 2012.

ISBN 978-88-579-0109-1

1. Coste – Protezione.

333.91716 CDD-22

SBN PAL0239368

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, febbraio 2012

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

INDICE

Prefazione

Introduzione

1. Idrodinamismo marino e geomorfologia costiera

1.1.	Premessa.....	»	1
1.1.1.	Dinamica costiera.....	»	1
1.1.2.	Erosione costiera.....	»	1
1.2.	Formazione ed evoluzione degli arenili.....	»	4
1.2.1.	Fasi successive di abrasione della costa.....	»	4
1.2.2.	Stadio iniziale dell'evoluzione di una regione litorale.....	»	5
1.2.3.	Stadio avanzato dell'evoluzione di una regione litorale.....	»	6
1.2.4.	Fasi dell'evoluzione morfologica di una parete litoranea.....	»	8
1.3.	I movimenti del mare.....	»	13
1.3.1.	Le correnti marine e i moti di deriva dei mari italiani.....	»	13
1.3.2.	Le correnti marine indotte dal vento: calcolo dell'intensità.....	»	15
1.3.3.	Settore di traversia composto.....	»	16
1.3.4.	Calcolo del fetch effettivo.....	»	18
1.3.5.	Moto ondoso: definizioni.....	»	19
1.3.6.	Moto ondoso: onde di burrasca.....	»	21
1.3.7.	Moto ondoso: previsione del vento di burrasca.....	»	22
1.3.8.	Moto ondoso: determinazione dell'onda caratteristica.....	»	23
1.3.9.	Moto ondoso: ingressione del mare.....	»	24
1.3.10.	Il fenomeno di rifrazione dell'onda.....	»	26
1.3.11.	Il fenomeno di riflessione dell'onda.....	»	28
1.3.12.	Il fenomeno dei frangenti.....	»	29
1.3.13.	Trasporti in senso trasversale al litorale.....	»	31
1.3.14.	Trasporti in senso longitudinale al litorale.....	»	33
1.3.15.	Profilo estivo e profilo invernale di una spiaggia.....	»	35
1.4.	Modifica dell'equilibrio dei litorali.....	»	36
1.4.1.	Erosione dei litorali italiani.....	»	36
1.4.2.	Erosione del litorale friulano.....	»	38
1.4.3.	Erosione del litorale veneto.....	»	38
1.4.4.	Erosione del litorale emiliano romagnolo.....	»	39
1.4.5.	Erosione del litorale marchigiano.....	»	40
1.4.6.	Erosione del litorale abruzzese e molisano.....	»	40
1.4.7.	Erosione del litorale pugliese.....	»	41
1.4.8.	Erosione del litorale calabrese.....	»	42
1.4.9.	Erosione del litorale lucano.....	»	42
1.4.10.	Erosione del litorale campano.....	»	43

1.4.11. Erosione del litorale laziale.....	»	44
1.4.12. Erosione del litorale toscano.....	»	45
1.4.13. Erosione del litorale ligure.....	»	45
1.4.14. Erosione del litorale siciliano.....	»	46
1.4.15. Erosione del litorale sardo.....	»	47
1.4.16. Software di settore.....	»	47
1.5. Formazione ed evoluzione delle dune litoranee sabbiose.....	»	48
1.5.1. Struttura di una duna sabbiosa litoranea.....	»	48
1.5.2. Dinamica e formazione di una duna litoranea sabbiosa.....	»	49
1.5.3. Natura del substrato delle spiagge e delle dune italiane.....	»	50
1.6. Bibliografia.....	»	52

2. Opere di difesa costiera

2.1. Introduzione.....	»	55
2.2. La protezione delle coste in Italia.....	»	56
2.3. Generalità sugli interventi.....	»	59
2.4. Quadro schematico per la scelta delle opere di difesa.....	»	66
2.5. Pennelli.....	»	68
2.5.1. Evoluzione del litorale per effetto dei pennelli.....	»	68
2.5.2. Pennelli di massi naturali e artificiali.....	»	71
2.6. Scogliere radenti.....	»	76
2.6.1. Generalità.....	»	76
2.6.2. Scogliere radenti in massi naturali sagomate.....	»	78
2.6.3. Scogliere radenti di massi naturali alla rinfusa.....	»	81
2.6.4. Scogliere radenti miste di massi naturali e artificiali sagomate.....	»	81
2.6.5. Scogliere radenti di massi artificiali allineati.....	»	86
2.6.6. Scogliere radenti in gabbioni metallici.....	»	88
2.7. Scogliere foranee.....	»	89
2.7.1. Scogliere foranee emerse.....	»	89
2.7.1.1. Generalità.....	»	89
2.7.1.2. Scogliere foranee di massi naturali.....	»	90
2.7.1.3. Scogliere foranee miste di massi naturali e artificiali.....	»	93
2.7.2. Scogliere foranee sommerse.....	»	96
2.7.2.1. Generalità.....	»	96
2.7.2.2. Funzioni difensive.....	»	97
2.7.2.3. Tubi in geotessile e materassi in rete metallica.....	»	99
2.8. Attività di recupero e ripristino.....	»	102
2.8.1. Recupero spiagge e habitat costieri.....	»	102
2.8.2. Interventi di emergenza.....	»	103
2.8.3. Interventi sperimentali.....	»	107
2.9. Ripascimenti e spiagge artificiali.....	»	107
2.9.1. Generalità.....	»	107
2.9.2. Le sabbie.....	»	110
2.9.3. Le cave.....	»	111
2.9.4. Le tecniche di prelievo e versamento.....	»	113
2.9.5. Naturalizzazione.....	»	114
2.9.6. Monitoraggio.....	»	115

2.9.7. Conclusioni	»	115
2.10. Esempi applicativi	»	116
2.10.1. Opere di difesa del litorale di Ostia.....	»	116
2.10.2. Ripascimenti del litorale emiliano-romagnolo.....	»	118
2.10.3. Ripascimenti del litorale Poetto a Cagliari.....	»	121
2.10.4. Ripascimenti del litorale Maronti a S. Angelo nell'isola d'Ischia	»	124
2.10.5. Ripascimenti del litorale a Cavo nell'Isola d'Elba	»	126
2.10.6. Costruzione di una spiaggia con sterili di cava: il caso della costa di Trani (BA)	»	126
2.10.7. Rinforzo dei litorali in Laguna di Venezia	»	128
2.11. Recupero delle dune.....	»	130
2.11.1. Stato dei complessi dunosi nel Mediterraneo	»	130
2.11.2. Formazione e sviluppo di complessi dunosi.....	»	132
2.11.3. Costruzione di dune armate alla foce del Po.....	»	136
2.12. Sistemi di difesa innovativi	»	136
2.12.1. Sistemi di difesa con geosintetici	»	136
2.12.2. Sistemi di difesa a elementi in acciaio	»	140
2.12.2.1. Elemento Erdox® stabilizzatore di versante.....	»	140
2.12.3. Sistemi di difesa di emergenza	»	142
2.12.4. Sistemi di difesa dei fondali di spiagge sommerse	»	144
2.13. Manutenzione delle opere di difesa della costa.....	»	146
2.13.1. Prescrizioni di carattere generale.....	»	146
2.13.2. Tipologie di opere e di interventi ammessi.....	»	147
2.13.3. Prescrizioni specifiche.....	»	148
2.13.4. Buone pratiche: criteri di intervento e modalità gestionali proposti	»	149
2.14. Normativa.....	»	149
2.14.1. Normativa italiana.....	»	149
2.14.2. Normativa regionale	»	152
2.14.3. Normativa tecnica	»	154
2.14.4. Gestione integrata della zona costiera.....	»	154
2.15. Programmi europei	»	156
2.15.1. Generalità	»	156
2.15.2. Progetto Beachmed.....	»	156
2.15.3. Trattati internazionali	»	158
2.16. Bibliografia.....	»	159
 3. Ecosistema costiero		
3.1. Coste mediterranee	»	161
3.2. La vegetazione dei litorali sabbiosi e salati	»	161
3.2.1. I fondali marini	»	161
3.2.2. Le spiagge arenose.....	»	162
3.2.3. Le dune.....	»	163
3.2.4. Le lagune e gli stagni salmastri.....	»	164
3.2.5. Le velme e le barene	»	165
3.3. La vegetazione dei litorali rocciosi.....	»	167
3.3.1. Le rupi marittime	»	167
3.4. La macchia.....	»	168

3.4.1.	Generalità	»	168
3.4.1.1.	Impatto antropico sulla macchia mediterranea.....	»	169
3.4.2.	La macchia di leccio.....	»	169
3.4.3.	La macchia a corbezzolo e a erica.....	»	171
3.4.4.	La macchia a cisti.....	»	172
3.4.5.	La macchia a ginepri	»	173
3.4.6.	La macchia a oleastro e lentisco	»	175
3.4.7.	La macchia a euforbia.....	»	176
3.4.8.	La macchia a palma nana.....	»	177
3.4.9.	La macchia a ginestre.....	»	178
3.4.10.	La macchia ad alloro.....	»	179
3.4.11.	La macchia a oleandro.....	»	181
3.5.	Fisionomia e adattamenti delle piante mediterranee	»	182
3.5.1.	Il clima	»	182
3.5.2.	Caratteri fisiologici	»	184
3.5.3.	Caratteri biologici	»	185
3.5.4.	Il vento	»	186
3.6.	Fisionomia e adattamenti delle piante delle sabbie.....	»	187
3.7.	Fisionomia e adattamenti delle piante dei suoli salsi.....	»	188
3.8.	Stabilizzazioni con piante vive e morte	»	189
3.8.1.	Gestione di Posidonia oceanica spiaggiata.....	»	190
3.9.	Strategie di conservazione.....	»	191
3.9.1.	Linee guida operative	»	191
3.9.2.	Conservatoria delle coste	»	193
3.9.2.1.	Motivazioni	»	193
3.9.2.2.	Compiti	»	194
3.9.2.3.	Il patrimonio gestito dalla Conservatoria delle coste.....	»	195
3.9.3.	Difesa dell'ambiente costiero in siti di interesse archeologico	»	196
3.9.3.1.	Cenni introduttivi.....	»	196
3.9.3.2.	Il caso di Kamarina	»	197
3.9.3.3.	Il caso della via Flacca	»	199
3.9.3.4.	Il caso di Capo Colonna	»	200
3.9.3.5.	Indirizzi operativi	»	201
3.10.	Bibliografia.....	»	202

4. Ingegneria naturalistica costiera

4.1.	Progettazione di interventi costieri.....	»	203
4.1.1.	Aspetti paesaggistici della progettazione	»	203
4.1.2.	Aspetti geomorfologici della progettazione	»	206
4.1.3.	Aspetti pedologici della progettazione.....	»	209
4.1.4.	Aspetti vegetazionali della progettazione.....	»	212
4.1.5.	Aspetti biotecnici della progettazione.....	»	216
4.1.5.1.	Sistema radicale delle piante	»	216
4.1.5.2.	Caratteristiche biotecniche delle piante.....	»	218
4.1.5.3.	Indagine sugli apparati radicali degli arbusti mediterranei.....	»	221
4.1.6.	Aspetti metodologici della progettazione	»	224
4.1.7.	Aspetti manutentivi della progettazione	»	230

4.1.8.	Aspetti eco-tecnologici della progettazione	»	231
4.1.8.1.	Generalità	»	231
4.1.8.2.	Definizioni.....	»	231
4.1.8.3.	Cenni storici ed elementi di attualità della fitodepurazione	»	233
4.1.8.4.	Vantaggi e svantaggi della fitodepurazione.....	»	234
4.1.9.	Aspetti valutativi.....	»	236
4.1.9.1.	Generalità	»	236
4.1.9.2.	Esempio applicativo su costa	»	236
4.1.10.	Esempio progettuale di sistemazione di una costa alta franosa lungo la linea ferroviaria Genova-Ventimiglia.....	»	238
4.1.11.	Esempio progettuale di sistemazione di una costa bassa erosa nell'area marina protetta di "Capo Rizzuto".....	»	242
4.2.	Buone pratiche per la gestione del sistema spiaggia-duna	»	245
4.2.1.	Generalità	»	245
4.2.2.	Gestione adattativa.....	»	251
4.2.2.1.	Descrizione generale	»	251
4.2.2.2.	Funzione	»	252
4.2.2.3.	Metodi.....	»	253
4.2.2.4.	Impatto.....	»	255
4.2.2.5.	Migliori pratiche e opportunità ambientali	»	255
4.2.3.	Piantagione erbacea su duna	»	255
4.2.3.1.	Descrizione generale	»	255
4.2.3.2.	Funzione	»	256
4.2.3.3.	Metodi.....	»	257
4.2.3.4.	Impatti.....	»	258
4.2.3.5.	Migliori pratiche e opportunità ambientali	»	258
4.2.3.6.	Provenienza del materiale di propagazione e riproduzione vivaistica delle specie legnose da utilizzare.....	»	259
4.2.4.	Copertura di duna	»	260
4.2.4.1.	Descrizione generale	»	260
4.2.4.2.	Funzione	»	260
4.2.4.3.	Metodi.....	»	260
4.2.4.4.	Impatti.....	»	262
4.2.4.5.	Migliori pratiche e opportunità ambientali	»	262
4.2.5.	Schermatura di dune	»	263
4.2.5.1.	Descrizione generale	»	263
4.2.5.2.	Funzione	»	263
4.2.5.3.	Metodi	»	264
4.2.5.4.	Impatti.....	»	267
4.2.5.5.	Migliori pratiche ambientali e opportunità	»	267
4.2.6.	Spiaggia di riciclo e di riprofilatura.....	»	267
4.2.6.1.	Descrizione generale	»	267
4.2.6.2.	Funzione	»	269
4.2.6.3.	Metodi.....	»	269
4.2.6.4.	Impatti.....	»	271
4.2.6.5.	Migliori pratiche ambientali e opportunità	»	272
4.2.7.	Strutture in sacchi di sabbia.....	»	273
4.2.7.1.	Descrizione generale	»	273
4.2.7.2.	Funzione	»	273

4.2.7.3.	Metodi.....	»	274
4.2.7.4.	Impatti.....	»	275
4.2.7.5.	Migliori pratiche ambientali e le opportunità	»	276
4.2.8.	Ripascimento della spiaggia.....	»	276
4.2.8.1.	Descrizione generale	»	276
4.2.8.2.	Funzione	»	277
4.2.8.3.	Metodi.....	»	278
4.2.8.4.	Impatti.....	»	280
4.2.8.5.	Migliori pratiche e opportunità ambientali	»	281
4.2.9.	Rivestimento in gabbioni.....	»	282
4.2.9.1.	Descrizione generale	»	282
4.2.9.2.	Funzione	»	282
4.2.9.3.	Metodi.....	»	283
4.2.9.4.	Impatti.....	»	285
4.2.9.5.	Migliori pratiche e opportunità ambientali	»	285
4.2.10.	Promontori artificiali	»	286
4.2.10.1.	Descrizione generale	»	286
4.2.10.2.	Funzione	»	287
4.2.10.3.	Metodi.....	»	288
4.2.10.4.	Impatti.....	»	290
4.2.10.5.	Migliori pratiche e opportunità ambientali	»	290
4.2.11.	Scogliere artificiali.....	»	291
4.2.11.1.	Descrizione generale	»	291
4.2.11.2.	Funzione	»	291
4.2.11.3.	Metodi.....	»	292
4.2.11.4.	Impatti.....	»	294
4.2.11.5.	Migliori pratiche e opportunità ambientali	»	295
4.2.12.	Frangiflutti prossimi alla riva	»	296
4.2.12.1.	Descrizione generale	»	296
4.2.12.2.	Funzione	»	296
4.2.12.3.	Metodi.....	»	297
4.2.12.4.	Impatti.....	»	299
4.2.12.5.	Migliori pratiche e opportunità ambientali	»	299
4.2.13.	Pennelli	»	300
4.2.13.1.	Descrizione generale	»	300
4.2.13.2.	Funzione	»	301
4.2.13.3.	Metodi.....	»	302
4.2.13.4.	Impatti.....	»	305
4.2.13.5.	Migliori pratiche e opportunità ambientali	»	305
4.2.14.	Drenaggio di riva	»	306
4.2.14.1.	Descrizione generale	»	306
4.2.14.2.	Funzione	»	307
4.2.14.3.	Metodi.....	»	308
4.2.14.4.	Impatti.....	»	309
4.2.14.5.	Migliori pratiche e opportunità ambientali	»	309
4.2.15.	Stabilizzazioni in pietrame	»	309
4.2.15.1.	Descrizione generale	»	309
4.2.15.2.	Funzione	»	310
4.2.15.3.	Metodi.....	»	311

4.2.15.4.	Impatti.....	»	313
4.2.15.5.	Migliori pratiche e opportunità ambientali	»	313
4.2.16.	Stabilizzazioni in legname.....	»	314
4.2.16.1.	Descrizione generale	»	314
4.2.16.2.	Funzione	»	314
4.2.16.3.	Metodi.....	»	315
4.2.16.4.	Impatti.....	»	316
4.2.16.5.	Migliori pratiche e opportunità ambientali	»	317
4.2.17.	Piantagione di fanerogame marine.....	»	317
4.2.17.1.	Descrizione generale	»	317
4.2.17.2.	Raccomandazioni pratiche.....	»	318
4.3.	Tecniche per la protezione del sistema spiaggia-duna-laguna	»	319
4.3.1.	Viminata viva con disposizione romboidale	»	319
4.3.2.	Barriera viva basale	»	321
4.3.3.	Schermi frangivento.....	»	323
4.3.4.	Sistemi combinati.....	»	325
4.3.5.	Palificata viva latina.....	»	327
4.3.6.	Blocchi incatenati.....	»	329
4.3.7.	Scogliera rinverdita.....	»	331
4.3.8.	Rivestimento in pietrame con impianto di talee	»	333
4.3.9.	Materasso preconfezionato in rete metallica rinverdito, con geostuoie e/o biostuoie	»	334
4.3.10.	Regolazione idrica con dragaggi e ricostruzione di dune, velme e barene	»	337
4.3.11.	Rivestimento vegetativo con geostuoie	»	338
4.3.12.	Rivestimento vegetativo con biostuoie.....	»	342
4.3.13.	Rivestimento vegetativo con rete metallica e geostuoie o biostuoie	»	345
4.3.14.	Messa a dimora di alberi e arbusti (a radice nuda, in zolla, in contenitore, in fitocella).....	»	347
4.3.15.	Messa a dimora di talee.....	»	349
4.3.16.	Trapianto di rizomi e cespi.....	»	351
4.3.17.	Fascinata spondale viva con culmi di canna	»	351
4.3.18.	Fascinata spondale viva sommersa.....	»	352
4.3.19.	Copertura diffusa con culmi di canna	»	353
4.3.20.	Rullo spondale con zolle (pani) di canne e fibra vegetale o sintetica.....	»	354
4.3.21.	Palificata viva spondale (con palo verticale frontale).....	»	357
4.3.22.	Palizzata viva.....	»	358
4.4.	Realizzazione di interventi costieri antiersivi	»	363
4.4.1.	Produzione di specie arbustive litoranee di provenienza locale per la ricostituzione degli habitat in Veneto.....	»	363
4.4.2.	Rivegetazione delle dune a Sylt.....	»	364
4.4.3.	Rivegetazione dei fondali dell'Alto Tirreno	»	368
4.5.	Realizzazione di interventi costieri stabilizzanti	»	369
4.5.1.	Ripascimenti e ricostruzione delle dune in Laguna di Venezia.....	»	369
4.5.2.	Ricostruzione dune a Castel Porziano.....	»	370
4.5.3.	Progetto Life-natura sulle dune costiere di Vendicari	»	375
4.5.4.	Ricostruzione di dune ad Albufera (Valencia)	»	376
4.5.5.	Ricostruzione di biotopi umidi a Pula (CA).....	»	379
4.5.6.	Conservazione del sistema dunale di Cala Mesquida a Capdepera (Maiorca – Isole Baleari).....	»	383

4.5.7.	Gestione del Parco naturale della Camargue (Arles).....	»	385
4.5.8.	Ricostruzione dunale a Torre Guaceto (BA).....	»	386
4.5.9.	Ampliamento e riqualificazione di aree umide retrodunali nel Parco regionale Migliarino-San Rossore-Massaciuccoli (PI).....	»	389
4.6.	Manutenzione delle opere di Ingegneria Naturalistica.....	»	390
4.6.1.	Manutenzione delle opere per il periodo di garanzia.....	»	391
4.6.2.	Manutenzione delle opere nel breve periodo.....	»	392
4.6.3.	Manutenzione delle opere a medio e lungo periodo.....	»	393
4.7.	Applicazione dell'Ingegneria Naturalistica alle zone percorse dal fuoco.....	»	393
4.7.1.	Cenni introduttivi.....	»	393
4.7.2.	Resilienza della vegetazione mediterranea.....	»	394
4.7.3.	Azioni prioritarie di intervento.....	»	394
4.7.4.	Interventi di recupero e ricostituzione della vegetazione.....	»	395
4.8.	Bibliografia.....	»	396

5. Monitoraggio delle opere costiere

5.1.	Cenni introduttivi.....	»	399
5.2.	Finalità e obiettivi per il monitoraggio.....	»	400
5.3.	Priorità per la misurazione.....	»	400
5.4.	Frequenza, tempi e posizione delle misurazioni.....	»	401
5.5.	Tecniche di monitoraggio.....	»	402
5.5.1.	Cenni introduttivi.....	»	402
5.5.2.	Creazione delle zone di litorale.....	»	403
5.5.3.	Individuazione di aree di erosione.....	»	403
5.5.4.	L'equipaggiamento.....	»	405
5.5.5.	Determinazione delle probabili cause di erosione.....	»	406
5.5.6.	Misurazione dell'entità dell'erosione.....	»	407
5.5.7.	Lista di controllo per l'erosione.....	»	407
5.5.8.	Fotografia aerea.....	»	409
5.6.	Misurazioni dell'ambiente fisico.....	»	410
5.7.	Raccolta e analisi dei dati.....	»	411
5.7.1.	Schede tecniche.....	»	412
5.8.	I monitoraggi floristici sugli interventi di rinaturalizzazione per la salvaguardia del litorale veneto (progetto Life Natura, 2004-2006).....	»	415
5.8.1.	Cenni introduttivi.....	»	415
5.8.2.	Metodo.....	»	416
5.8.3.	La mappatura degli habitat.....	»	418
5.9.	Monitoraggio delle azioni di tutela di habitat prioritari costieri della Riserva naturale statale di Torre Guaceto (progetto Life Natura, 2006-2008).....	»	419
5.9.1.	Contenuti e obiettivi generali del piano di monitoraggio.....	»	419
5.9.1.1.	L'azione "Monitoraggio degli interventi".....	»	419
5.9.1.2.	I tipi di intervento e le implicazioni teoriche relative allo sviluppo del programma di monitoraggio.....	»	420
5.9.1.3.	Gli indicatori.....	»	422
5.9.1.4.	Il rilevamento.....	»	424
5.9.2.	Definizione degli indicatori.....	»	424
5.9.3.	Indicazioni sul rilevamento e il trattamento dei dati.....	»	427

5.9.3.1.	Il materiale necessario	»	427
5.9.3.2.	I metodi.....	»	428
5.9.3.3.	La scheda di registrazione.....	»	430
5.9.3.4.	Il rapporto annuale di monitoraggio	»	431
5.10.	Bibliografia	»	432
6. L'ecosistema marino			
6.1.	Principi e definizioni generali.....	»	433
6.2.	Biodiversità marina e del Mediterraneo.....	»	434
6.3.	Zonazione biologica	»	437
6.4.	Tropicalizzazione del Mediterraneo.....	»	438
6.5.	Specie endemiche del Mediterraneo.....	»	440
6.6.	Fanerogame marine.....	»	441
6.6.1.	Aspetti biologici	»	441
6.6.2.	Aspetti ecologici	»	444
6.6.3.	Aspetti vegetazionali	»	447
6.7.	Posidonia oceanica.....	»	448
6.7.1.	Generalità	»	448
6.7.2.	Caratteristiche morfologiche.....	»	450
6.7.3.	Caratteristiche ecologiche	»	451
6.7.4.	Caratteristiche riproduttive	»	453
6.7.5.	Funzioni della prateria.....	»	454
6.7.6.	Formazione ed evoluzione di un posidonieto	»	456
6.7.7.	Cause di regressione delle praterie	»	458
6.7.8.	Biomasse vegetali spiaggiate	»	461
6.8.	Poriferi.....	»	463
6.8.1.	Generalità	»	463
6.8.2.	Caratteristiche morfologiche.....	»	464
6.8.3.	Caratteristiche ecologiche	»	464
6.8.4.	Funzioni	»	464
6.9.	Tutela e gestione di ecosistemi marini costieri.....	»	465
6.10.	Bibliografia.....	»	468
7. Ingegneria naturalistica marina			
7.1.	Trapianto di fanerogame bentoniche costiere.....	»	471
7.1.1.	Prime esperienze nel Mediterraneo	»	471
7.1.2.	Sedimenti delle praterie di Posidonia oceanica	»	474
7.1.3.	Progettazione di ripristini di praterie a fanerogame marine.....	»	478
7.1.3.1.	Progetto di rivegetazione nell'Oasi Blu "Scogli di Isca"	»	478
7.1.3.2.	Ricerca bibliografica.....	»	479
7.1.3.3.	Rilievo dati geomorfologici delle coste	»	480
7.1.3.4.	Rilievo dati oceanografici delle acque marine.....	»	481
7.1.3.5.	Rilievo dati della qualità delle acque marine.....	»	482
7.1.3.6.	Sollecitazioni agenti sul fondo.....	»	485
7.1.3.7.	Modalità operative	»	486
7.1.3.8.	Individuazione dei siti di intervento.....	»	488

7.1.3.9.	Analisi dei costi e della redditività della rivegetazione dei fondali.....	» 489
7.1.4.	Realizzazioni di interventi di trapianto di fanerogame marine.....	» 490
7.1.4.1.	Trapianto di fanerogame marine a Gabicce Mare (AN)	» 490
7.1.4.2.	Trapianto di fanerogame marine a Rapallo (GE)	» 491
7.1.4.3.	Progetto di ripristino di Cymodocea n. a Port Cros	» 492
7.1.4.4.	Progetto “Nomatec” di ripristino praterie in Corsica.....	» 494
7.1.4.5.	Risanamento dei fondali in Laguna di Venezia	» 496
7.1.4.6.	Sperimentazione di rivegetazione a Cavo nell’Isola d’Elba.....	» 499
7.1.5.	Tecniche di intervento	» 502
7.1.5.1.	Schede descrittive dei georivestimenti.....	» 502
7.1.5.2.	Schede descrittive dei materassi rivegetati.....	» 505
7.1.6.	Conclusioni	» 511
7.2.	Sistemi di tutela delle praterie a fanerogame marine	» 512
7.2.1.	Barriere artificiali sommerse	» 512
7.2.1.1.	Cenni introduttivi.....	» 512
7.2.1.2.	Le barriere artificiali nella gestione delle risorse marine	» 512
7.2.1.3.	Le barriere artificiali nella azione anti-pesca a strascico.....	» 513
7.2.1.4.	Barriere artificiali a Loano (sv)	» 515
7.2.1.5.	Barriere artificiali a Rossano (CS).....	» 518
7.2.1.6.	Barriere artificiali Tecnoreef	» 519
7.2.2.	Ormeggi sostenibili.....	» 520
7.2.2.1.	Cenni introduttivi.....	» 520
7.2.2.2.	Ormeggi sostenibili nell’AMP di Capo Carbonara.....	» 521
7.2.2.2.1.	Vantaggi	» 522
7.2.2.3.	Ormeggi sostenibili nel Parco naturale di Port Cros (Francia) ...	» 523
7.2.2.4.	Ancoraggi antisfilamento	» 524
7.3.	Acquacoltura per spugne marine	» 525
7.3.1.	Cenni introduttivi.....	» 525
7.3.2.	Progetto di spongicoltura “Nomatec”	» 526
7.3.2.1.	Cenni introduttivi.....	» 526
7.3.2.2.	Primo anno di progetto.....	» 527
7.3.2.3.	Secondo anno di progetto.....	» 528
7.3.3.	Progetto di spongicoltura nell’AMP “Cinque Terre”	» 529
7.3.4.	Progetto di spongicoltura nel porto di Rapallo	» 530
7.4.	Bibliografia.....	» 531

8. Monitoraggio delle praterie a fanerogame marine

8.1.	Programma nazionale di tutela	» 533
8.2.	Metodologie di sorveglianza di un posidonieto.....	» 534
8.2.1.	Cenni introduttivi.....	» 534
8.2.2.	Livello della pianta.....	» 535
8.2.3.	Livello della prateria.....	» 536
8.2.4.	Livello della comunità associata.....	» 538
8.3.	Monitoraggio delle praterie di Posidonia oceanica.....	» 538
8.3.1.	Sorveglianza delle praterie di Posidonia oceanica in Calabria.....	» 538
8.3.2.	Sorveglianza delle praterie di Posidonia oceanica a Favignana (TP)	» 541

8.3.2.1.	Indagini.....	»	541
8.3.2.2.	Risultati ottenuti.....	»	542
8.3.2.3.	Considerazioni finali	»	546
8.3.3.	Sorveglianza delle praterie di Posidonia oceanica a Sanremo (IM)	»	547
8.3.4.	Sorveglianza delle praterie di fanerogame marine in Laguna di Venezia ...	»	550
8.3.5.	Mappatura di Posidonia oceanica in Costa Azzurra	»	552
8.3.5.1.	Cenni introduttivi.....	»	552
8.3.5.2.	Quadro d'unione	»	553
8.3.5.3.	Carte di dettaglio di stazioni e osservazioni specifiche	»	555
8.3.5.4.	Microcartografia	»	557
8.3.5.5.	Considerazioni finali	»	559
8.4.	Bibliografia.....	»	560
	Rassegna fotografica	»	561

PREFAZIONE

Da tempo l'ingegnere Boccalaro si dedica con grande competenza al vasto tema di come contrastare il degrado fisico del territorio con rimedi improntati all'Ingegneria naturalistica. Nel 2007 riassunse i suoi studi al riguardo pubblicando il volume *Difesa del territorio e ingegneria naturalistica*. Dall'ampio ventaglio di argomenti trattati allora, il nostro Autore ha estrapolato e messo a fuoco, in questo nuovo libro, un soggetto di notevole importanza e attualità: la difesa delle coste in generale e il ruolo dell'Ingegneria naturalistica in particolare. Dopo la difesa del suolo volta a impedirne lo sfacelo "verticale" in tutti gli ambienti naturali, l'Autore rivolge adesso la sua attenzione alla difesa areale del territorio costiero. Analizza le cause del degrado e ne descrive i rimedi idonei a contenerne gli effetti, cioè la sottrazione di superficie dovuta all'erosione marina. Questa da tempo erode interi arenili, demolisce i sistemi dunosi e altera l'ambiente circostante. L'evoluzione distruttiva dei litorali sabbiosi risale all'ultimo cinquantennio, allorché è cambiato di segno il bilancio sedimentario costiero. Il ripascimento naturale delle spiagge, il loro protendimento dovuto alla deposizione lungo le stesse dei sedimenti portati dai fiumi, che convogliavano verso il mare la terra strappata dai monti diboscati e soggetti a dissesto idrogeologico, è cessato quasi del tutto, anche se il dissesto idrogeologico non è stato debellato affatto. Questo rifornimento, che eccedeva un tempo la quantità di materiali erosi dal moto ondoso, è venuto meno in concomitanza con lo sviluppo del territorio, cioè con i massicci prelievi di sabbia per le attività costruttive e, per lo stesso motivo, l'estrazione spesso abusiva di inerti dagli alvei fluviali, lo sbarramento dei fiumi con dighe che ne arrestano la portata solida, la proliferazione di porti turistici con creazione di moli guardiani che intercettano il trasporto litoraneo delle correnti marine, provocando devastanti erosioni sottoflutto.

L'assottigliamento delle spiagge ha numerose conseguenze negative: fa giungere i marosi a ridosso delle infrastrutture stradali e ferroviarie che si sviluppano lungo le coste basse, e che vanno difese con scogliere; provoca la demolizione parziale o totale delle dune con la conseguente alterazione o addirittura distruzione della copertura vegetale, imbruttendo il paesaggio e minacciando la conservazione della biodiversità, per cui se ne impone la conservazione, il restauro quando sono danneggiate e la ricostruzione allorché sono totalmente collassate; sottrae spazi vitali al turismo estivo, che poggia sulla balneazione e le piccole attività sportive connesse, minacciandolo di estinzione estesa alla vita di interi villaggi con le loro strutture abitative e alberghiere, costituenti risorse occupazionali, per cui si cerca di salvarlo ricreandone la base fisica mediante il ripascimento artificiale degli arenili.

Oltre alla trattazione generale delle cause, della normativa e dei rimedi, affidati alla vegetazione, tra cui le praterie di fanerogame marine, il libro passa in rassegna la situazione italiana regione per regione, fornendo in tal modo un quadro d'insieme valido anche per chi si occupa di pianificazione e di gestione dei sistemi ambientali a grande scala. Numerosi esempi corredano l'opera accrescendone l'utilità per i progettisti, ai quali vengono forniti i dati occorrenti per il progetto e per l'esecuzione dei lavori.

Salvatore Puglisi

INTRODUZIONE

*L'uomo ragionevole adegua se stesso al mondo;
l'uomo irragionevole persiste nel tentativo di adeguare il mondo a se stesso.
Perciò ogni progresso dipende dall'uomo irragionevole.*

George Bernard Shaw

1. Habitat marini costieri europei

Ciò che in prima istanza va notato è che l'entità della perdita di habitat marini costieri è quanto mai allarmante: a oggi, infatti, soltanto meno del 15% degli habitat costieri europei può essere considerato in buone condizioni e la situazione risulta ancora più drammatica per quanto riguarda le coste italiane lungo le quali le attività dell'uomo si sono concentrate per secoli. Da quanto appena evidenziato, appare chiaro che sottovalutare queste perdite può compromettere la salute e la sostenibilità dei pochi frammenti di habitat naturali che ancora sopravvivono, con gravissime ripercussioni anche per l'industria del turismo (Airoidi e Beck, 2007).

Nei secoli le bonifiche, lo sviluppo costiero incondizionato, il sovrasfruttamento delle risorse della pesca e l'inquinamento hanno portato alla scomparsa di vastissime porzioni di habitat costieri naturali. Tra questi le lagune costiere, le praterie di fanerogame marine (piante superiori dotate di radici, fusto, foglie, fiori e frutti; tra cui la più nota è la *Posidonia oceanica*), altri vegetali marini (macroalghe), banchi di ostriche, mitili e altre formazioni organogene. Questi habitat forniscono importantissimi servizi all'uomo, come cibo, medicinali, difesa da mareggiate e inondazioni, controllo dell'erosione costiera, svago e ricreazione. Di fatto, il valore economico dei servizi forniti da praterie di fanerogame marine, estuari e lagune costiere è stimato dieci volte superiore a quello di qualsiasi sistema terrestre, con valori che raggiungono i 23.000 euro per ettaro all'anno. La perdita di questi sistemi naturali ha causato danni economici rilevanti per molti paesi europei, inclusa l'Italia. Basti pensare al problema dell'erosione costiera (mediamente 3 milioni di euro di interventi di difesa all'anno per le sole coste della regione Emilia-Romagna), facilitata dalla perdita di habitat marini che forniscono alle coste delle difese naturali.

In Europa restano pochi esempi di habitat nativi costieri ancora intatti e questi sono seriamente minacciati dai cambiamenti globali in corso. È auspicabile la loro immediata protezione all'interno della rete *Natura 2000*, un complesso di siti protetti nel territorio dell'Unione europea, la cui funzione è garantire la sopravvivenza a lungo termine della biodiversità del continente europeo. Per prevenire l'ulteriore perdita di habitat marini costieri saranno necessari seri investimenti di ripristino e la cooperazione attiva tra agenzie governative, organizzazioni non governative e università e centri di ricerca.

Gli habitat marini temperati costeggiano alcune delle nazioni più sviluppate del mondo in Europa e Nord America. Pertanto, nell'interesse dei cittadini, è auspicabile che i governi

attuino politiche volte a migliorare la gestione e la sostenibilità futura di questi habitat così incredibilmente ricchi di specie e così produttivi (Airoldi e Beck, 2007).

Per proteggere in maniera efficace e ripristinare tali habitat, innanzitutto occorre che venga colmata urgentemente la carenza di dati sulla vegetazione marina e lagunare, sui banchi di ostriche e altre formazioni organogene marine, investendo nella ricerca ambientale e nelle collaborazioni internazionali.



Figura 1. Le dune costiere in Europa (fonte: Pranzini, 2004)

2. Ambiente costiero in Italia

Si potrebbe pensare che le spiagge e le dune siano ambienti privi di valore economico in quanto troppo instabili e soggette a erosione e mareggiate e quindi generalmente non edificabili; attività agricole (essenzialmente orticoltura) sono possibili unicamente nella fascia più interna e nelle lacune interdunali, cioè al di fuori della duna vera e propria. Nonostante ciò le spiagge di tutto il Mediterraneo – e in modo specifico quelle italiane – subiscono da alcuni decenni un impatto generalizzato che rischia di generare alterazioni irreversibili. Gli impatti sulle spiagge sono causate per lo più da un'errata politica di gestione del territorio e vengono aggravati dalle conseguenze, dirette e indirette, dello sviluppo del turismo di massa. L'impatto è visibile soprattutto attraverso danni diretti o indotti all'ambiente fisico, come sbancamenti e processi di erosione ben visibili su molte spiagge e attraverso la semplificazione delle comunità biotiche, spesso banalizzate da elementi estranei cosiddetti *eurieci* (cioè organismi che presentano un notevole grado di adattabilità), tolleranti e ad ampia distribuzione geografica.

È necessario confrontare gli ecosistemi costieri sabbiosi, per loro stessa natura e collocazione topografica, con situazioni difficili e mutevoli, nel breve e nel lungo termine. Va notato che le loro capacità di, per così dire, "autoriparazione" e di resilienza dal punto di vista idrogeologico, geomorfologico, floristico e faunistico sono ovviamente molto elevate.

Queste considerazioni potrebbero indurre a pensare che gli ambienti costieri sabbiosi, anche dove disturbati pesantemente dalle attività antropiche o, in alcuni casi, totalmente distrutti, siano in grado prima o poi di ricostituire naturalmente ecosistemi litoranei di buona qualità ambientale. Se è vero che tali ipotesi abbiano un che di fondato (ma con prospettive di decine o centinaia di anni), è estremamente importante sottolineare quanto siano però difficilmente compatibili con scenari a breve termine.

Successivamente ci si occuperà delle possibili strategie di conservazione, gestione e recu-

pero ambientale che interessano gli ambienti litoranei sabbiosi italiani.

È invece utile descrivere quelle che alcuni specialisti hanno chiamato *le leggi dei litorali sabbiosi*: queste leggi governano in effetti molti dei meccanismi geomorfologici di rischio che coinvolgono i sistemi spiaggia-duna e pertanto è bene tenerne conto.



Figura 2. Ambiente costiero integro (fonte: Boccalaro, 2006)

Per quanto riguarda le leggi dei litorali sabbiosi si veda l'approfondimento 1 contenuto nel cd allegato.

3. La commissione De Marchi

È noto che la cosiddetta *Commissione De Marchi*, dal nome del grande esperto di idraulica ing. Giulio De Marchi, nel 1970 elaborò una relazione conclusiva sulla *Sistemazione idraulica e la difesa del suolo* in Italia, da cui si riportano alcune considerazioni importanti riguardo la difesa dal mare dei territori litoranei.

“L’azione statale, per il suo carattere del tutto generale per tutti i litorali, dovrà essere normalizzata e coordinata mediante la compilazione di apposito “piano delle opere di difesa dei litorali”. (...) Lo studio del piano delle opere di difesa dei litorali dovrebbe essere portato a termine rapidamente e consistere in:

- rilievo del territorio litoraneo;
- conoscenza e studio della storia delle diverse unità fisiografiche;
- analisi dei rilevamenti mareografici;
- raccolta del materiale necessario alla comprensione dei fenomeni, onde giudicare sui criteri effettivi di intervento e pianificazione;
- progetto del piano delle opere marittime e di quelle terrestri connesse, con l’indicazione della disciplina a cui dovranno essere sottoposte.

(...) Un fattore negativo per la conservazione delle coste è il loro uso intensivo, che spesso è irrazionale, di urbanizzazione senza valutazione di quei limiti e vincoli che sono imposti dalle condizioni fisiche locali e dell’unità fisiografica.

Accade che in terreni demaniali marittimi, con o senza autorizzazione, imprese turistiche o edili, ecc. distruggano o gravemente alterino nella loro struttura, composizione e densità rimboschimenti di pini e altre specie eseguiti dalla Amministrazione forestale dello Stato. Anche i boschi naturali, le formazioni arbustive pioniere delle sabbie vengono distrutte e altresì non sono rari gli esempi della distruzione delle dune sabbiose per attuare insediamenti con finalità turistiche. Su queste coste spogliate dalle loro formazioni vegetali o indebolite a causa

dell'asportazione di notevoli quantità di sabbie costituenti cordoni dunosi sul lato mare, cioè private di quelle forze elastiche, resistenti al vento e all'acqua marina con grande efficacia, l'erosione eolica e quella marina acquistano nuovo vigore. Inoltre, gli inquinamenti di origine industriale e domestica delle acque lagunari e marine, contribuiscono a distruggere quei particolari microclimi (marini, lagunari e litoranei) favorevoli alla vita degli organismi vegetali e animali.

Alla permanenza di equilibri biologici corrispondono più favorevoli condizioni per il mantenimento degli equilibri fisici delle coste, mentre di seguito alla loro rottura sopravviene una condizione di instabilità fisica delle coste."

"Dall'esame delle situazioni descritte sotto il profilo dei loro aspetti di sistemazioni montane (stabilità delle terre e buon ordine idraulico), con riferimento al ripascimento naturale delle spiagge, e di bonifica idraulica delle zone costiere, con riferimento alla permanenza dell'attuale linea delle coste, ritengo necessario richiedere:

- a) intangibilità assoluta delle coste marine e lagunari, sia delle parti emerse sia di quelle sommerse, e della loro vegetazione di ogni tipo e specie, salvo quanto sarà disposto al punto d) seguente;
- b) ripresa del risanamento e rimboschimento dei terreni litoranei (demaniali e privati) sottoposti a pericolo di ablazione marina, previo acquisto ed esproprio dei terreni privati o sicure garanzie di intangibilità per quelli appartenenti al demanio marittimo;
- c) revisione severa della regolamentazione per la derivazione delle acque dei fiumi e delle concessioni di estrazione degli inerti, in modo da non sconvolgere il loro normale regime idraulico e la loro capacità di ripascere naturalmente le spiagge;
- d) controllo coordinato e reciprocamente vincolante delle pubbliche amministrazioni dello Stato e delle Regioni, che sono interessati alla difesa del suolo, alla regolazione dei corsi d'acqua, all'uso del territorio, alla tutela del demanio idrico, terrestre e marittimo;
- e) manutenzione, ripristino e adeguamento tecnico di tutte le opere arginali di bonifica per la difesa dei valori immensi costituitisi nei territori bonificati e pertanto con spesa a totale carico dello Stato."

Da queste affermazioni emerge un'anticipazione di quella che sarebbe stata la tendenza successiva, da parte degli operatori ambientali e degli amministratori più illuminati, di rinaturalizzare il più possibile le zone costiere compromesse da un eccessivo impatto antropico. Un approccio che è stato anche adottato dalla corrente più evoluta di pensiero degli ingegneri idraulici, come si evidenzia nel successivo paragrafo.

4. Da una rigida difesa costiera a una gestione dinamica dell'ambiente costiero con l'aiuto della ingegneria ecologica

Va osservato che durante l'ultimo decennio si è avuta un'evoluzione nella difesa delle coste sabbiose, da una rigida protezione del litorale verso un approccio più flessibile, con la ricostituzione del litorale di sabbia.

Si è reso necessario un approccio sistemico più olistico (indirizzato verso un approccio multidisciplinare e lo studio di problemi che prevedono interazioni complesse tra le loro

parti costituenti), dove la conoscenza del movimento della sabbia fornisce la chiave per la sostenibilità e lo sviluppo di interi ecosistemi dunali costieri.

In via schematica si presenta un insieme di principi di ingegneria ecologica, elaborati dall'ingegnere olandese H.D. Van Bohemen:

1. si consideri un intervento umano nel paesaggio in un contesto ecologico a tutti i livelli di scala. Il carattere del sito o *genius loci* (l'insieme delle caratteristiche naturali, socio-culturali, architettoniche, di linguaggio, di abitudini che caratterizzano un luogo, un ambiente) dovrebbe costituire il punto di partenza;
2. uno degli obiettivi nella pianificazione, realizzazione e gestione di interventi di ingegneria civile dovrebbe essere quello di facilitare l'auto-regolazione dei processi ecologici;
3. la progettazione di interventi costieri dovrebbe tener conto dell'importanza del ritmo relativamente veloce o lento dei processi ecologici e far sì che le specie vegetali e animali, legate a una bassa dinamica ambientale, siano in grado di trovare opportunità in siti dinamici;
4. una condizione ecologicamente integra dovrebbe essere mantenuta e, se possibile, promossa ovunque: ciò significa ottimizzare le condizioni abiotiche, biotiche e fisiche, al fine di soddisfare il più possibile i requisiti di funzionamento dell'ecosistema;
5. il progetto degli interventi di ingegneria civile deve essere adattato agli ecosistemi locali. Le funzioni dell'ecosistema devono essere rispettate e deve essere intrapreso il corretto utilizzo dei beni e dei servizi ecosistemici;
6. i servizi ecosistemici, così come la produzione di beni, dovrebbero essere combinati per quanto possibile;
7. il progetto, la realizzazione e la manutenzione di un'opera di ingegneria civile devono mirare a prevenire l'impatto negativo sulle situazioni a elevata flessibilità e, ove possibile, ripristinare o aggiungere diversità invece di imporre confini rigidi;
8. i modelli e i processi ecologici o le modifiche a questi dovrebbero essere il più possibile visibili, percettibili e, se concesso, sperimentabili;
9. tutti i soggetti direttamente interessati (committente, cliente, progettista, costruttore) e tutti quelli indirettamente coinvolti (utenti futuri, manager, imprenditori di demolizione) devono essere consultati in ogni fase del processo, che comprende la pianificazione, la progettazione, la costruzione, la gestione e la demolizione delle opere di ingegneria civile. Anche coloro che possono essere interessati, nel presente o nel futuro, dovrebbero essere coinvolti o almeno presi in considerazione;
10. gli effetti dannosi non dovrebbero essere trasferiti ad altri soggetti o ad altri luoghi, né nel presente né nel futuro. Devono adottarsi misure di mitigazione se effetti negativi dovessero prodursi a seguito di un intervento, anche se sono state adottate misure preventive e/o è stato fatto un tentativo per evitare tali effetti. Se, nonostante tutti gli sforzi fatti, gli effetti negativi persistono, la compensazione dovrebbe essere utilizzata per evitare un'ulteriore perdita di valori ecologici. Inoltre, deve essere promosso, ove possibile, il ripristino dei valori ecologici originari intaccati.

5. L'esperienza sulla rete ferroviaria italiana

L'ing. Cesare Scatena, con il suo splendido manuale *La difesa dal mare delle linee ferroviarie*, ha guidato l'autore nella sua attività passata di ingegnere manutentore delle linee

ferroviarie liguri, spesso minacciate dalle forti mareggiate invernali. Si riporta di seguito un estratto dal suo testo riguardo i criteri da seguire nella scelta e progettazione delle opere di difesa costiere.

Il problema della protezione delle coste mediante opere, quali le scogliere foranee ed i pennelli, presenta particolari difficoltà in quanto non può esservi a priori assoluta certezza che la soluzione adottata possa sortire esito favorevole; inoltre non è da escludersi che il nuovo regime determinato nel paraggio dalla presenza della difesa, pur essendo in grado di procurare un'adeguata protezione del tratto di costa prima minacciato, possa contemporaneamente dar luogo ad alterazioni nelle zone adiacenti a tale tratto, spesse volte in punti anche considerevolmente lontani. È opportuno pertanto che si proceda nella progettazione di una difesa dal mare tenendo conto dei seguenti criteri validi per qualunque tipo di opera che si intenda adottare.

- 1) Tenere nella debita considerazione e valutare opportunamente: le caratteristiche dei movimenti migratori dei materiali litici (con particolare attenzione al senso nel quale in prevalenza tali movimenti si verificano); la posizione, rispetto all'opera da costruire, delle fonti di rifornimento dei materiali stessi (consistenti prevalentemente nelle conoidi formate alle foci dei fiumi che sboccano nelle zone adiacenti del litorale); la ripartizione dei materiali lungo gli arenili dovuta alle caratteristiche del litorale nonché ai movimenti delle acque marine in prossimità del litorale stesso; la composizione granulometrica dei materiali suddetti ed infine la quantità dei materiali che mediamente persiste nella zona. Questi elementi sono determinanti agli effetti dei risultati di un'opera di difesa dal mare, nel senso che da essi dipende la possibilità o meno della ricostituzione di un arenile eroso e pertanto in base ad essi si potrà stabilire il tipo di difesa da adottare.
- 2) Dare alle opere dimensioni e forme determinate, in modo da raggiungere i seguenti scopi fondamentali:
 - a) evitare di contrastare eccessivamente i movimenti naturali delle acque marine, cercando di assecondarli il più possibile; al riguardo già gli antichi romani erano giunti a questa saggia conclusione: *Ne coneris contra ictum fluctus; fluctus obsequio blandiuntur*;
 - b) favorire la tendenza naturale del mare al ripascimento, nel senso di non impedire del tutto l'azione di trascinamento dei materiali sciolti lungo l'arenile e di non ostacolare il raggiungimento dell'arenile da parte dei materiali sciolti, zappati, nella zona dei frangenti, dal moto ondoso e da questo trascinati in sospensione verso la riva.



Figura 3. Tratto costiero in adiacenza alla ex linea ferroviaria passante per San Lorenzo al Mare (IM), futura pista ciclabile

- 3) Non subordinare l'entità dell'opera e tanto più il tipo da adottare al fattore economico.

Infatti trattandosi di opere che vengono sottoposte a cimenti particolarmente notevoli, che spesso volte possono raggiungere entità eccezionali. Una difesa costruita con criteri di eccessiva economia può, in occasione di qualche violenta mareggiata, andare completamente o parzialmente distrutta, con conseguente possibilità di gravi danni alla sede ferroviaria e necessità di ricostruire nuovamente l'opera oppure di dover sostenere sensibili spese di manutenzione.

- 4) Abbondare sempre nel dimensionamento delle opere di difesa dal mare e prevedere per esse strutture dotate di particolare robustezza e solidità. Al riguardo è da rilevare che a causa dell'impossibilità di conoscere l'entità e le caratteristiche dei cimenti cui l'opera è sottoposta quando viene colpita dall'onda, non si può effettuare un calcolo delle dimensioni da dare alla difesa e neppure un calcolo di verifica della sua stabilità.

Di conseguenza occorre dimensionare le opere sulla base dell'esperienza e cioè tenendo conto del comportamento di altre opere, costruite nelle zone vicine, che sono sottoposte più o meno a mareggiate della stessa entità.

È pertanto soprattutto sulla sensibilità e sul grado di esperienza del progettista che si deve fare affidamento per avere una difesa opportunamente dimensionata e strutturalmente razionale.

- 5) Esaminare attentamente nella progettazione di una difesa, l'opportunità o meno, di prevedere la sua esecuzione in un'unica fase oppure in più fasi e ciò in relazione sia alla tendenza dell'opera a modificare i processi naturali che si verificano in quella zona del litorale sia all'entità delle difese stesse.”

Questi consigli tecnici e le esperienze vissute in prima persona dall'autore hanno portato sempre di più a considerare l'importanza della conoscenza del territorio, con le sue dinamiche geomorfologiche e dell'ambiente, con le sue dinamiche ecologiche, per affrontare al meglio un intervento di difesa costiera che mantenga a lungo la sua efficacia, giungendo alla convinzione che è sempre preferibile adottare soluzioni flessibili, contenute e di breve-media durata piuttosto che soluzioni rigide, imponenti e di lunga durata.

6. Ingegneria naturalistica

Tra le discipline tecniche che intervengono nella soluzione dei problemi creati dal dissesto idrogeologico si è inserita ormai da diversi anni l'Ingegneria Naturalistica, che trova ampio spazio di trattazione nel presente manuale.

L'Ingegneria Naturalistica (I.N., ted. *Ingenieurbiologie*, ingl. *Biological Engineering*, franc. *Génie Biologique*) è una disciplina tecnica che utilizza le piante vive negli interventi antiersivi e di consolidamento, in genere, in abbinamento con altri materiali (legno, terra, roccia, geotessili, reti zincate, ecc.), per la ricostruzione di ecosistemi tendenti al naturale e all'aumento della biodiversità. I campi di intervento vanno da quelli tradizionali di consolidamento dei versanti e delle frane al recupero delle aree degradate (cave, discariche, cantieri), alla mitigazione degli impatti legati alla realizzazione di opere di ingegneria (barriere antirumore e visive, filtri alla diffusione di polveri, ecosistemi-

filtro a valle di scarichi idrici), all'inserimento ambientale delle infrastrutture di trasporto lineari (scarpate stradali e ferroviarie), alla rinaturazione dei corsi d'acqua, ecc. (Boccalaro, 2007).

Le finalità degli interventi di Ingegneria Naturalistica sono principalmente:

- tecnico-funzionali, ad esempio antiersive e di consolidamento di una scarpata o di una sponda;
- naturalistiche, in quanto lo scopo non è la semplice copertura a verde, ma la ricostituzione o l'innescio di comunità vegetali appartenenti alla serie dinamica autoctona;
- estetiche e paesaggistiche di inserimento nel paesaggio naturale;
- economiche, in quanto tipologie alternative e competitive alle opere tradizionali (ad esempio muri di sottoscarpa in cemento sostituiti da palificate vive).

Gli interventi di Ingegneria Naturalistica si contraddistinguono da quelli tradizionali per:

- l'esame delle caratteristiche microclimatiche, geomorfologiche e pedologiche delle aree di intervento;
- l'analisi floristica e vegetazionale, con particolare riferimento alla ricostruzione della serie dinamica e all'individuazione delle specie d'impiego in funzione delle loro caratteristiche biotecniche;
- l'uso di materiali non tradizionali quali i geotessuti sintetici in abbinamento a piante o parti di esse;
- l'accurata selezione delle specie vegetali da impiegare (miscele di sementi, specie arboree e arbustive, talee, rizomi, trapianti di zolle);
- l'abbinamento della funzione di consolidamento con quella del reinserimento ambientale;
- il miglioramento nel tempo delle suddette funzioni per lo sviluppo delle parti aeree e sotterranee delle piante.



Figura 4. Ripristino del sistema dunare di Cala Mesquida a Capdepera (Isole Baleari – Maiorca) con tecniche di Ingegneria Naturalistica (fonte: Boccalaro, 2010)

Lo studio di un intervento di Ingegneria Naturalistica comporta le seguenti fasi:

- indagini bibliografiche;
- indagine geologica e geomorfologica;
- indagini pedologica;
- indagine floristica e vegetazionale per l'individuazione delle specie e delle tipologie vegetazionali d'intervento;
- definizione dei criteri progettuali;
- definizione delle tipologie di Ingegneria Naturalistica;
- elenco delle specie floristiche da impiegare.

Opere di Ingegneria Naturalistica vengono realizzate da oltre trent'anni nei paesi di lingua tedesca, mentre in Italia le esperienze principali sono state fatte nel Centro-Nord. Nel settore costiero importanti interventi sono stati realizzati in Australia (Queensland), in Nuova Zelanda, in USA (Florida), in Sudafrica (Cape Province), in Europa:

- sia lungo la costa atlantica (Irlanda, Inghilterra, Scozia, Danimarca (Jutland), Germania (Sylt), Olanda, Francia (Aquitaine), Spagna, Portogallo;
- sia lungo la costa mediterranea (Coto Doñana, Valencia, Baleari, Camargue, Costa Azzurra, Creta, delta del Nilo).

In Italia gli interventi più importanti di ripristino degli ecosistemi dunali sono stati realizzati nella laguna di Venezia e Grado, penisola del Cavallino, Litorale Veneto, delta del Po, Torre del Cerrano, duna e lago di Lesina, Torre Guaceto, Porto Cesareo, Selinunte, Vendicari, stagno e ginepreto di Platamona, Pula, Piscinas, foce del Volturno, spiaggia Cala del Cefalo, dune del Circeo, Castel Porziano, Macchia Grande, Macchiatonda, palude della Trappola, Torre del Lago, San Rossore.

Anche sul piano legislativo tali tecniche vengono ormai espressamente richieste come nella legge speciale 102/90 per la Valtellina o in diverse norme regionali per gli interventi di difesa del suolo.

L'interesse per tali tecniche è anche manifestato dai manuali tecnici usciti negli ultimi anni quali quelli predisposti dalle Regioni Emilia Romagna, Veneto, Lazio, Toscana, Liguria, Lombardia, Marche e Campania, dalle Province di Bolzano, Trento e Terni e dal Ministero dell'ambiente.

Si può quindi affermare che l'Ingegneria Naturalistica ha ormai superato in Italia la fase pioniera e si sta accreditando presso le pubbliche amministrazioni e i professionisti come uno strumento fondamentale per la salvaguardia del territorio e la riqualificazione dell'ambiente.

7. Manuale di difesa dell'ambiente costiero

Il presente manuale si rivolge agli operatori tecnici ambientali e ai gestori che si devono occupare di ripristino, gestione e manutenzione dei sistemi costieri spiaggia-duna e che spesso devono affrontare problemi di emergenza per il territorio causati dalle mareggiate (arretramento dei litorali).

Si è cercato di rappresentare tutti gli aspetti (progettuali, costruttivi, manutentivi, sorvegliativi) degli interventi di difesa delle coste, seppur con la consapevolezza di dover spesso rinunciare ai necessari approfondimenti di singoli argomenti, rimandati alla bibliografia, a favore però di un sguardo d'insieme sintetico e logico.

L'Ingegneria naturalistica ha avuto un'attenzione particolare nel presente manuale essendo, per il settore della difesa costiera, una disciplina nuova e nello stesso tempo dimenticata (si vedano le antiche tecniche di sistemazione dunali conosciute dai primi tecnici forestali, come illustrato in figura 5).

Si spera con questo lavoro di coniugare quindi innovazione e tradizione per una gestione del territorio volta al risparmio di risorse, alla prevenzione del dissesto e al rispetto dell'ambiente.

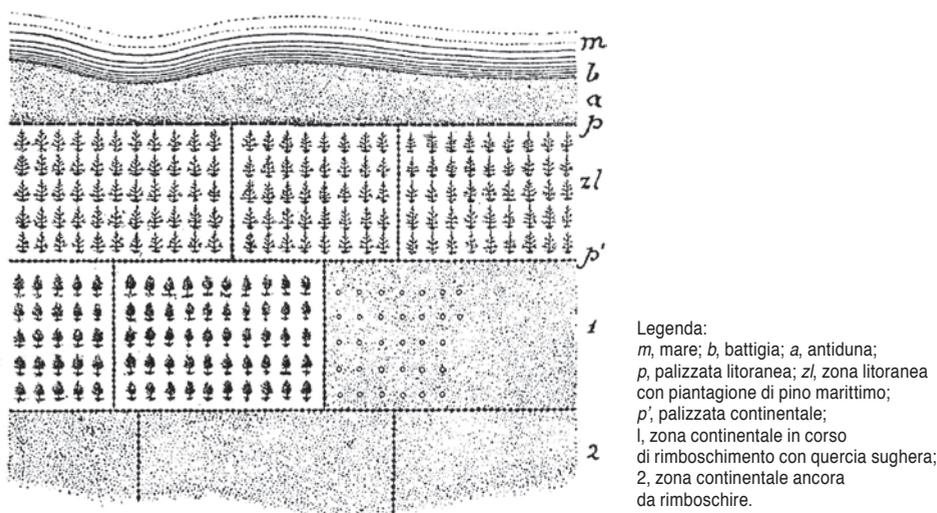


Figura 5. Schema generale degli interventi di fissazione delle dune litoranee mediante vegetazione col metodo Brémontier – Lande di Guascogna (fonte: Piccioli, 1923)

Si ringrazia l'amico e collega Nicola Cantasano (CNR Isafom, Cosenza) per la stesura del capitolo dedicato all'habitat marino.

Si ringraziano inoltre gli amici e colleghi della SIGEA (Giuseppe Gisotti, Gioacchino Lena), dell'AIPIN (Paolo Cornolini, Giuliano Sauli, Giancarlo Bovina, Salvatore Puglisi) e gli autori citati nei capitoli e in bibliografia per i consigli e i contributi forniti all'autore. Si auspica che pervengano dai fruitori del manuale consigli e suggerimenti per migliorare il presente lavoro.

8. Bibliografia

- Airoldi L., Beck M., Loss, *Status and Trends for Coastal Marine Habitats of Europe*, in *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 2007.
- Audisio P. Muscio G., Pignatti S., *Problemi di conservazione e gestione*.
- Boccalaro F., *Difesa del territorio e ingegneria naturalistica*, Dario Flaccovio Editore, 2007.
- Piccioli L., *Selvicoltura*, Unione Tipografica Editrice Torinese, 1923, in AA.VV. *Manuale studio cave, discariche e coste*, Regione Lazio.
- Pranzini E., *La forma delle coste. Geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali*, Zanichelli, 2004.
- Scatena C., *La difesa dal mare delle Linee Ferroviarie*, FS – Servizio Lavori e Costruzioni, Roma, 1967.
- Van Bohemen H.D., *Ecological Engineering and Civil Engineering Works – A Practical Set of Ecological Engineering Principles for Road Infrastructure and Coastal Management*, 2004.

1. IDRODINAMISMO MARINO E GEOMORFOLOGIA COSTIERA

*Alle onde dell'oceano, la canoa oppone la prua;
alle onde degli uomini l'uomo oppone il suo coraggio.*

Canto maori



1.1. Premessa

1.1.1. Dinamica costiera

I materiali che si incontrano nelle zone litoranee derivano principalmente dall'apporto dei corsi d'acqua che sfociano in mare. Essi convogliano il materiale solido asportato dal loro bacino imbrifero: tale materiale costituisce l'elemento fondamentale per determinare l'erosione o il protrondimento di un litorale e, caso limite dei due, la fase di equilibrio.

Le coste italiane, con uno sviluppo di circa 8000 km, si caratterizzano per il 53% da spiagge la cui tendenza evolutiva è la seguente (si veda figura 1.1): 42% in erosione, 55% in equilibrio, naturalmente o per i numerosi provvedimenti di difesa, e solo 3% in avanzamento.

I protrondimenti e le erosioni sono in diretta relazione con i quantitativi di materiali apportati dai fiumi e non trascinati dall'azione del mare fuori dalla piattaforma litoranea.

Detti quantitativi di materiali permangono nella stessa unità fisiografica di litorale e, con l'alternarsi della direzione delle agitazioni ondose e relative correnti, si spostano, generando erosioni rapide e successivi ripascimenti lenti (si veda figura 1.2). Vale la pena osservare che, se i quantitativi trasportati verso gli abissi fossero compensati dagli apporti fluviali, si avrebbe l'equilibrio di un litorale.

1.1.2. Erosione costiera

Fra le principali cause che sono all'origine di gran parte dei fenomeni di erosione litoranea in atto (figura 1.3), vanno ricordate:

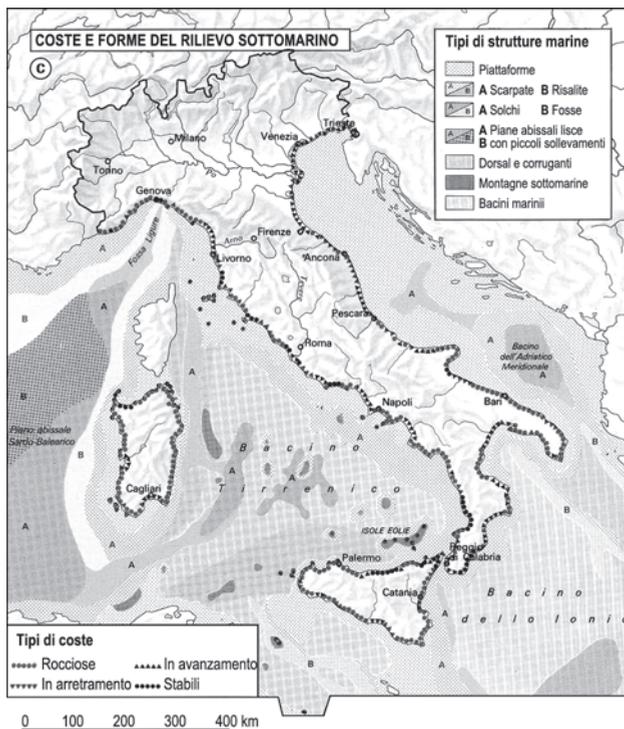


Figura 1.1. Morfologia costiera e rilievo sottomarino in Italia (fonte: Atlante Touring, 2002)

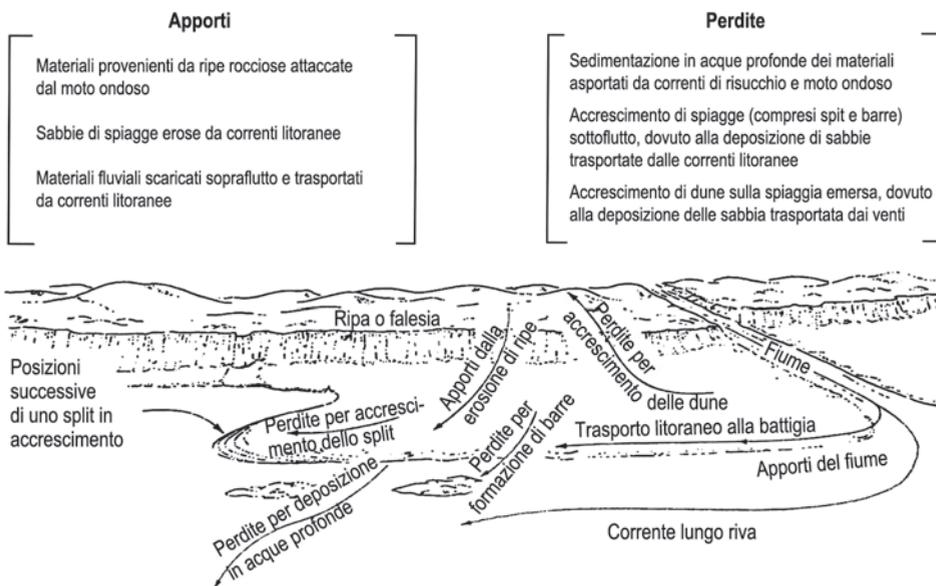


Figura 1.2. Bilancio apporti-perdite nella dinamica geomorfologica della costa

- la costruzione lungo i corsi dei fiumi di invasi e derivazioni;
- le sistemazioni montane e idrauliche che, perseguendo il fine pubblico della difesa del suolo e della realizzazione del buon ordine idraulico, attenuano la forza distruttiva delle acque del terreno sui versanti montani e rallentano il movimento dei materiali lapidei lungo i corsi d'acqua;
- la creazione di porti artificiali guadanti al mare, le cui opere foranee vengono a costituire enormi pennelli simili, negli effetti, ai protendimenti dei delta fluviali, ma tanto più dannose quanto più la loro forma crea un netto ed efficace ostacolo al trasporto solido dei materiali parallelamente ai litorali;
- il notevole asporto continuo di ghiaia e sabbia lungo l'alveo di fiumi e torrenti per fini edilizi, agricoli, di costruzioni di rilevati stradali, rilevati arginali e trasversali, impianti sportivi, ecc. e inoltre l'asportazione continua di sabbia e di limi dalle lagune e dalle spiagge, anche con la distruzione delle dune e cordoni dunosi per fini di difesa idraulica, per la costruzione di impianti balneari, ecc. e infine per lo sfruttamento di cave sulle coste alte e rocciose;
- la distruzione massiva della vegetazione naturale o artificiale litoranea;
- l'inquinamento delle acque marine e terrestri che determina, con l'avvelenamento delle falde idriche, la scomparsa della vegetazione naturale (o artificiale) protettiva;
- cause sfavorevoli di ordine geografico, astronomico, meteorico, idrodinamico, geologico.

Regione	Pressione turistica in migliaia (ISTAT, 1999)	Costa totale (km) (ISTAT, 1999)	Costa balneabile (km) (ISTAT, 1998)	Edificato (intrusivo + estensivo) (%) (wwf, 1996)	Costa libera (%) (wwf, 1996)
Piemonte	4552	–	–	–	–
Valle d'Aosta	921	–	–	–	–
Lombardia	12.210	–	–	–	–
Trentino Alto Adige	6752	–	–	–	–
Veneto	11.585	156,3	96	60	40
Friuli Venezia Giulia	2080	109,8	60,5	75	25
Liguria	4108	345,8	281	85	15
Emilia Romagna	8409	129,5	96,3	71	29
Toscana	10.325	572,6	400,8	57	43
Umbria	2004	–	–	–	–
Marche	2429	172	144,1	91	9
Lazio	10.016	356,6	242,2	83	17
Abruzzo	1701	124,3	112,6	100	0
Molise	324	34,3	33,3	96	4
Campania	6970	461,2	345,6	93	7
Puglia	3556	829,9	669,4	86	14
Basilicata	585	59,2	52,8	45	55
Calabria	1893	710	596,5	83	17
Sicilia	5703	1424,70	822,5	82	18
Sardegna	2359	1639,20	922	27	73
Totale	96.482	7125,4	4875,6	71	29

Tabella 1.1. Impatto sulle coste italiane (fonte: wwf, 1996)

Percentuale della costa libera (fonte: WWF, 1996)

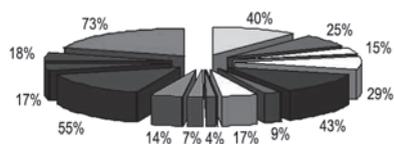


Figura 1.3
Grafico impatto sulle coste italiane
(fonte: wwf, 1996)



1.2. Formazione ed evoluzione degli arenili

1.2.1. Fasi successive di abrasione della costa

Allo scopo di comprendere la natura e la struttura dell'arenile, è necessario in prima istanza esaminare in che modo un arenile abbia potuto avere origine.

Le onde del mare, formatesi al largo, si avvicinano rapidamente alla parete costiera della terraferma e, quando la raggiungono, vi si frangono, dando luogo all'asportazione (abrasione) di materiale lapideo lungo una striscia orizzontale di altezza variabile, a seconda della violenza e dell'entità delle onde stesse (figura 1.4).

In tale zona viene a formarsi un solco continuo ma di profondità variabile, da tratto a tratto, in relazione alla diversa resistenza offerta dalla roccia nonché alla differente forza d'urto delle onde lungo il fronte di frangimento. Gli stessi materiali strappati alla parete vengono ripresi dal mare e scagliati violentemente contro la parete stessa. Naturalmente questo "bombardamento" facilita l'azione abrasiva del mare.

Approfondendo il solco, si verifica lo scalzamento della parete al suo piede (riferito questo alla parte emersa) e successivamente il crollo di masse rocciose che, se di opportune dimensioni, possono resistere all'urto delle onde e rimanere nel punto di caduta. Diversamente esse vengono rimosse e a loro volta scagliate, come i materiali di abrasione, contro la parete e frantumate.

Qualora la parete presenti zone di minor resistenza ben delimitate, tutto attorno, da rocce più dure, possono in tali zone formarsi cavità o vere e proprie caverne.

Il processo sopra descritto, proseguito lentamente, ma costantemente nel tempo, dà luogo ad un arretramento continuo e progressivo della parete e ad un ampliamento contemporaneo di quel gradino che si forma in corrispondenza della zona superficiale del mare e che viene chiamato "piattaforma di abrasione".

Questa viene a trovarsi a quote non molto profonde, poiché l'azione meccanica del moto ondoso che la produce si attenua rapidamente scendendo verso le profondità marine.

La suddetta piattaforma viene a delimitare in sommità quella parte della terraferma che rimane così sommersa dal mare e che viene a costituire il cosiddetto *zoccolo roccioso*, che è delimitato verso gli abissi marini da una scarpa avente una pendenza sensibilmente superiore a quella della piattaforma di abrasione.

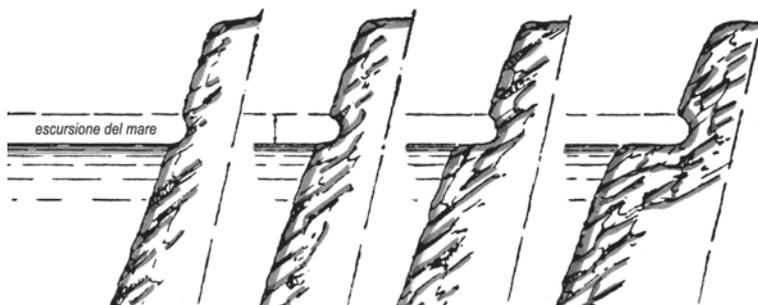
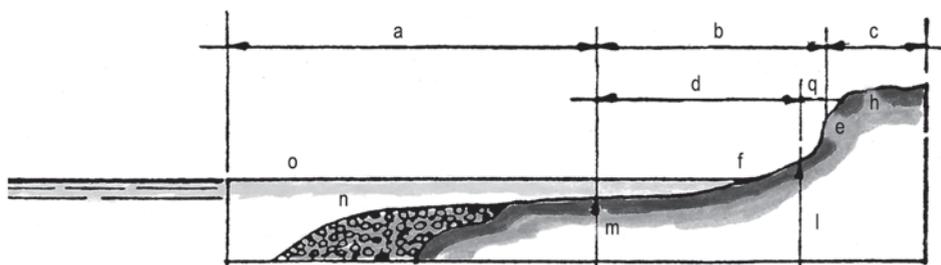


Figura 1.4. Fasi successive di abrasione della costa (fonte: Scatena, 1967)

1.2.2. Stadio iniziale dell'evoluzione di una regione litorale

Lo stadio iniziale dell'evoluzione di una regione litoranea venne rappresentato da Douglas Wilson Johnson nello schizzo indicato in figura 1.5, nella quale si è riportata anche la nomenclatura usata dallo stesso Johnson per le varie zone di tale regione in questo stadio. Fa parte di questa fase evolutiva della regione litoranea la formazione, al piede della piattaforma di abrasione e in aderenza alla scarpa dello zoccolo roccioso, di un ammasso di materiali sciolti provenienti dall'abrasione e dalla disgregazione della parete costiera. In questa fase, infatti, la cosiddetta *piattaforma di abrasione* viene ad avere una limitata



NOMENCLATURA SECONDO JOHNSON

- a - Piattaforma iniziale di avanzamento
- b - Costa litoranea
- c - Costa emersa
- d - Costa litoranea posteriore
- e - Linea di costa (limite d'esposizione permanente della costa emersa all'azione del mare)
- o-f - Livello medio del mare
- h - Scarpa della costa
- l - Limite superiore dell'escursione massima di alta marea
- m - Limite inferiore dell'escursione massima di bassa marea
- n - Ugnatura della piattaforma e ciglio della scarpa dello zoccolo del litorale
- q - Costa litoranea anteriore

Figura 1.5. Stadio iniziale dell'evoluzione di una regione litorale (fonte: Johnson in Scatena, 1967)

ampiezza e una certa pendenza, per cui i materiali suddetti, sottoposti ai movimenti dovuti all'azione del mare, rotolano su di essa, raggiungendo facilmente il ciglio e precipitando lungo la scarpa, fino a raggiungere una posizione di equilibrio.

Successivamente, addentrandosi il mare nella costa e ampliandosi la piattaforma di abrasione, questa viene ad avere un'inclinazione sempre più ridotta, che permette la permanenza sulla piattaforma stessa dei sedimenti sciolti.

Lo strato di questi costituisce una coltre protettiva che impedisce l'ulteriore abrasione della piattaforma rocciosa, nonché della costa emersa, in quanto il mare viene a frangersi naturalmente su tale strato e non più sulla terraferma. Ciò, però, sino a che cause particolari non determinano l'allontanamento dei sedimenti (sia pure in parte), dopo di che si verifica una ripresa dell'abrasione e di un nuovo ciclo evolutivo.

1.2.3. *Stadio avanzato dell'evoluzione di una regione litorale*

Lo stadio avanzato dell'evoluzione di una regione litorale, chiamato *stadio avanzato di sviluppo*, è stato rappresentato da Douglas Wilson Johnson nello schizzo indicato in figura 1.6, nella quale si è indicata anche la nomenclatura usata dallo stesso Johnson per indicare le varie zone della regione in questa fase.

Se si confronta la figura 1.6 con la 1.5, si può notare che in quest'ultima la piattaforma rocciosa di abrasione si è notevolmente ampliata ed è completamente coperta da uno strato di materiali sedimentari, che interessa anche la scarpa dello zoccolo roccioso.

In questa fase si chiama *zoccolo litorale* il complesso costituito dallo zoccolo roccioso propriamente detto e dai materiali che lo ricoprono.

La parte superiore dello zoccolo litorale compresa tra la linea estrema del litorale emerso (*e*) e il ciglio (*n*) dello zoccolo (*ugnatura* dello strato clastico dove il fondo marino cambia bruscamente la pendenza) viene chiamata *piattaforma litorale*.

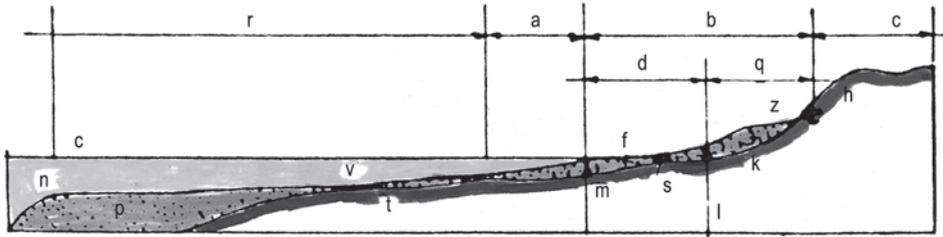
Essa è in definitiva la regione litoranea della terraferma che è soggetta all'azione morfologica del mare, azione che si manifesta attraverso i marosi nella zona continentale emersa (tratto *e-m*) e attraverso i movimenti delle acque marine nella zona marittima sommersa (tratto *m-n*).

Il livello raggiunto dal mare al limite inferiore dell'escursione massima di marea (*m*) delimita le due zone suddette.

Da quanto sopra esposto sembra lecito affermare che l'ampiezza della piattaforma litoranea possa considerarsi l'indice prevalente del grado di trasformazione di una costa.

Le due fasi evolutive appena descritte sono state presentate quali stadi di una data costa legati fra loro da un rapporto di successione nel tempo. In effetti, esse possono esistere contemporaneamente in coste diverse (questo è sempre avvenuto in ogni epoca della vita del globo terracqueo) e ciò per il fatto che i fenomeni di trasformazione delle singole coste non solo sono cominciati in epoche diverse (perché non tutte le regioni sono emerse dal mare contemporaneamente e nemmeno tutti i mari si sono formati nello stesso momento), ma anche si sono sviluppati con ritmo diverso da zona a zona a causa di numerosi fattori:

- la violenza e la frequenza delle mareggiate;
- l'estensione dei mari;
- l'orientamento delle coste rispetto alla direzione delle mareggiate;



NOMENCLATURA SECONDO JOHNSON

- a - Piattaforma iniziale di avanzamento
- b - Costa litoranea
- c - Costa emersa
- d - Costa litoranea posteriore
- e - Linea di costa (limite d'esposizione permanente della costa emersa all'azione del mare)
- o-f - Livello medio del mare
- h - Scarpa della costa
- k - Substratum roccioso della spiaggia
- l - Limite superiore dell'escursione massima di alta marea
- m - Limite inferiore dell'escursione massima di bassa marea
- n - Ugnatura della piattaforma e ciglio della scarpa dello zoccolo del litorale
- q - Costa litoranea anteriore
- p - Costa litoranea anteriore
- p - Strato clastico della piattaforma
- r - Piattaforma litoranea foranea
- s - Sedimenti sciolti della spiaggia
- t - Piattaforma di abrasione
- v - Strato clastico dell'impellecciatura
- z - Piattaforma emersa della spiaggia anteriore

Figura 1.6. Stadio avanzato dell'evoluzione di una regione litorale (fonte: Johnson in Scatena, 1967)

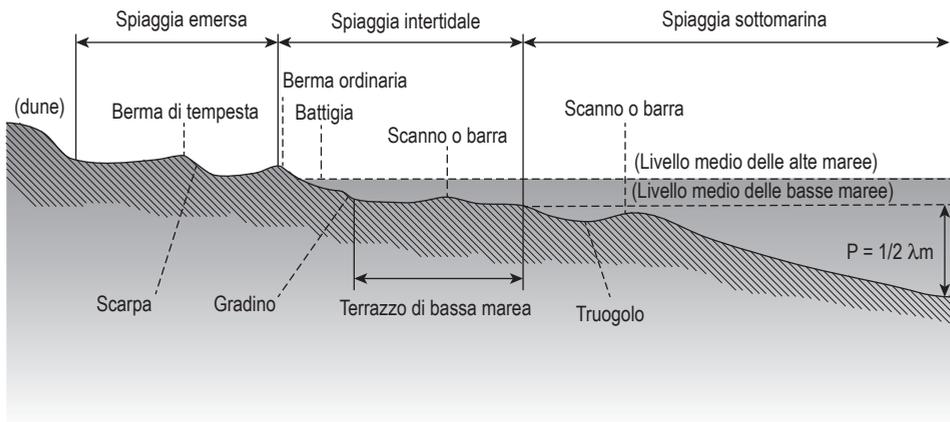


Figura 1.7. Profilo trasversale di una spiaggia (fonte: APAT, 2005)

- la presenza di correnti marine;
- l'entità delle escursioni di marea;
- la maggiore o minore durezza delle rocce;
- l'eterogeneità della composizione litologica delle coste e altri ancora.

Tutte le fasce costiere, che delimitano terre e continenti, sono costituite da un'alternanza di tratti appartenenti all'uno e all'altro stadio: i tratti appartenenti al primo stadio, costituiti di rocce coerenti, sono chiamati, in senso stretto, *coste*, e quelli appartenenti al secondo stadio, formati da rocce incoerenti (ghiaie e sabbie), sono chiamate *spiagge*.

1.2.4. Fasi dell'evoluzione morfologica di una parete litoranea

Quando le coste sono formate da terreni di media resistenza, oltre al mare, sono determinanti le azioni delle acque di origine meteorica, sia che esse cadano direttamente sulla parete costiera sia che esse, provenienti dalla superficie sovrastante la regione continentale, si riversino su di essa.

Nel primo caso, esse compiono azione di dilavamento oppure di disgregazione superficiale, che dà luogo a caduta di materiali lungo la parete e infine sul fondo marino costituito dalla piattaforma.

Nel secondo caso, incanalandosi lungo compluvi esistenti sulla superficie rugosa della zona continentale, raggiungono il ciglio della scarpata e qui, precipitando a cascata, formano un solco che, col passare del tempo, si approfondisce sempre più, contemporaneamente ai compluvi, che vengono gradualmente incisi e depauperati di quei materiali litici che sono trasportati verso la costa e riversati in mare.

Questa azione demolitrice, nel caso di terre poco resistenti, si estende in profondità anche sotto il livello del mare e, in larghezza, lungo il litorale, da ambo i lati adiacenti al compluvio, sino ad arrestarsi là dove esistono zone rocciose particolarmente resistenti, che costituiscono capisaldi lungo i litorali (speroni rocciosi, punte, promontori).

Analogamente compiono, nei riguardi dell'erosione della regione litoranea, le acque sorgive sgorganti nella regione continentale, acque che, confluendo nei compluvi, danno origine ai corsi d'acqua perenni.

Questi ultimi, grazie all'opera lenta e millenaria di erosione della terraferma, trasportano al mare notevoli quantità di materiali litici, dei quali parte scende nelle profondità marine lungo la scarpa dello zoccolo litorale e parte si addensa presso le foci, formando ampie conoidi. Da queste attinge il mare, con i suoi movimenti, per ripartire i materiali lungo le coste sulla piattaforma litorale.

L'evoluzione geomorfologica del tratto costiero del Cilento preso ad esempio, esteso per circa 6 km a SE di Acciaroli (figura 1.9), mostra un'area caratterizzata dalla diffusa presenza di rocce e di terreni particolarmente attaccabili dall'erosione marina che causa spesso arretramenti della linea costiera e l'innescò di frane e influenzata dall'azione della tettonica quaternaria e dalle caratteristiche geo-meccaniche delle rocce costituenti il substrato meso-cenozoico.

La costa presenta numerose frane e incisioni lineari e appare molto articolata. I promontori si sono impostati in corrispondenza di incroci di faglie e di affioramenti di rocce più lapidee (Torre la Punta), mentre i golfi in corrispondenza di rocce a maggiore componente pelitica (golfo tra Punta Caleo e Torre la Punta).



Figura 1.8. Evoluzione di una costa con strati rocciosi a Capo Rizzuto (KR) (fonte: Boccalaro, 2008)

Questo tratto costiero risulta interessato da diversi ordini di terrazzi di erosione dei quali i più alti e antichi sono conservati come piccoli relitti a quote di circa 150 m e 70 m s.l.m. I fenomeni franosi sono testimoniati dalla presenza di morfologie relitte rappresentate da estese nicchie e da grandi cumuli. Talora, in prossimità della costa, si rilevano fenomeni di riattivazione di tali cumuli, in gran parte assimilabili a scorrimenti rotazionali innescati dall'azione di scalzamento al piede del moto ondoso (figura 1.8).

È indubbio che i corsi d'acqua danno il maggiore contributo alla formazione e al mantenimento degli arenili.

Nel caso di terreni di natura argillosa, si può verificare che acque meteoriche o di provenienza sorgiva, con le loro infiltrazioni nell'interno, diano luogo al rammollimento dei terreni stessi e quindi a smottamenti che contribuiscono a mutare il volto della terra emersa e ad alimentare lo strato sedimentario.

È utile ricordare inoltre l'azione del vento sulle rocce delle coste (erosione eolica), che in talune regioni della terra ha un effetto di trasformazione abbastanza rilevante.

Altra causa di trasformazione delle coste sono le correnti marine, dovute ai venti, alle maree, alle differenze di salinità e di temperatura delle acque.

Infatti, alcune correnti, secondo le esperienze al riguardo effettuate da eminenti studiosi, verrebbero ad assumere velocità tali da poter rimuovere e trasportare anche ghiaie grossolane.

Tali correnti possono, con la loro azione, determinare spostamenti di materiali costituenti lo strato sedimentario della piattaforma (favorendo così indirettamente ulteriori erosioni della costa), nonché dirette erosioni ed escavazioni nella scarpata dello zoccolo litorale, sia sulla parte elastica sia su quella rocciosa, con formazione di scoscendimenti o cavità che possono dar luogo a crolli di materiali (frane sottomarine) e a conseguenti modifiche nell'equilibrio raggiunto dalla costa stessa.

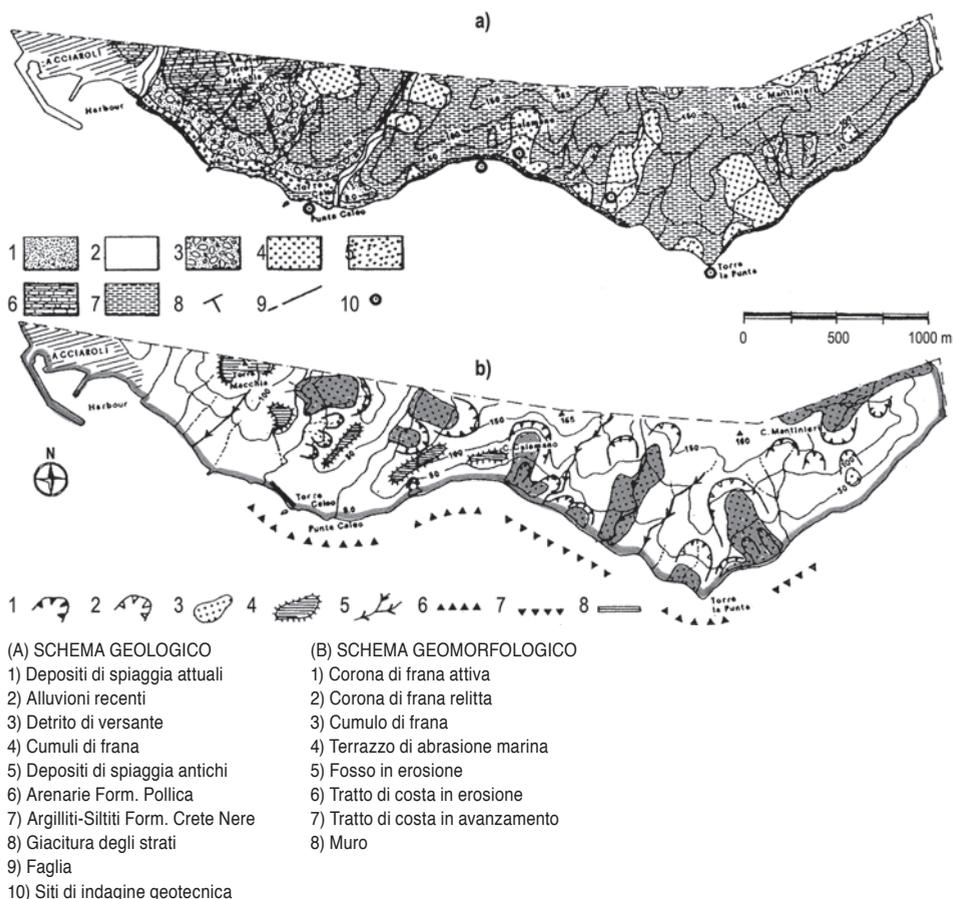


Figura 1.9. Schema geologico e geomorfologico di un tratto di costa del Cilento (fonte: Budetta, 1998, in AA.VV., 2003)

Oltre alle coste ottenute attraverso i processi di trasformazione di pareti litorali, si hanno altri tipi di coste di diversa origine, quali le coste piatte formatesi a seguito sia di movimenti di emersione sia di depositi alluvionali di materie provenienti dai continenti. Tale è la costa occidentale dell'Adriatico settentrionale, che ha avuto origine grazie agli apporti dei fiumi che vi sboccano.

Si è precedentemente accennato al fatto che la trasformazione di una costa non avviene in modo uniforme lungo tutto il fronte di erosione del mare, così da avere un arretramento costante della zona litorale.

Particolare influenza ha sulla velocità di retrocessione della parete litorale la costituzione geologica della costa, in relazione alla quale si ha una resistenza all'erosione diversa da punto a punto della costa stessa.

Conseguenza di ciò sono i diversi aspetti dei profili trasversali, nonché di quelli orizzontali delle coste.

Per quanto riguarda i primi, si riscontra che le rocce molto resistenti, di natura omogenea,

danno origine a pareti verticali. Se le rocce sono mediamente resistenti, ma uniformi per la composizione litologica, le pareti sono inclinate e la loro inclinazione dipende dal grado di coerenza delle rocce stesse. Quando invece le rocce sono caratterizzate da stratificazioni, le ripe assumono forme diverse e irregolari in dipendenza dell'inclinazione dei piani di stratificazione.

In figura 1.10 si riportano tre fasi dell'evoluzione morfologica di una parete litorale, relative al suo passaggio da costa a spiaggia. I processi fondamentali di trasformazione sopra descritti si sono verificati in lunghissimi periodi di tempo e hanno determinato sensibili modifiche nella zona della terraferma a contatto del mare, sino ad arrivare a quello che è l'aspetto attuale delle coste.

Le trasformazioni delle coste proseguono comunque incessantemente e costantemente e ciò per il fatto che non vengono meno le cause che le determinano.

Nel caso in questione, indubbiamente, hanno particolare, se non esclusivo, interesse quelle trasformazioni di carattere locale e contingente che riguardano la zona emersa della piattaforma litoranea (spiaggia), nonché una corrispondente porzione di zona sommersa, la cui ampiezza varia da caso a caso.

Al riguardo però è da rilevare come simili manifestazioni, pur essendo esse determinate, nella maggior parte dei casi, dall'azione dinamica del mare in relazione a particolari situazioni temporanee, possono tuttavia qualche volta costituire le conseguenze dirette o indirette di quei fenomeni di carattere più generale che si sono appena esaminate.

Parte di quelle erosioni che si verificano oggi in molte spiagge, fra cui in particolare quelle adriatiche, è da attribuirsi all'arretramento della linea di battigia, determinato in prevalenza dal fenomeno di innalzamento del livello del mare. Questo fenomeno comporta infatti l'avvicinamento della linea di battigia alla terraferma e quindi, con la riduzione degli arenili, la possibilità di azioni danneggiatrici del mare.

Nonostante l'interesse della presente trattazione, come si è detto, sia limitato ai fenomeni di minore entità relativi alla fascia litoranea, si è ritenuto tuttavia opportuno insistere su questo argomento della trasformazione delle coste, poiché attraverso la sua trattazione è possibile farsi un'idea abbastanza precisa della natura e della struttura di quella parte della terraferma che si trova a contatto del mare e si possono meglio comprendere quei fe-

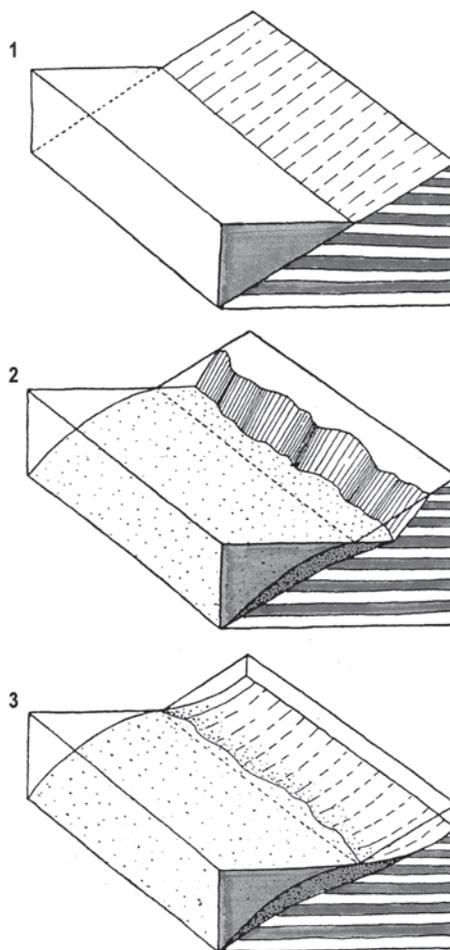


Figura 1.10. Fasi dell'evoluzione morfologica di una parete litoranea (fonte: Scatena, 1967)

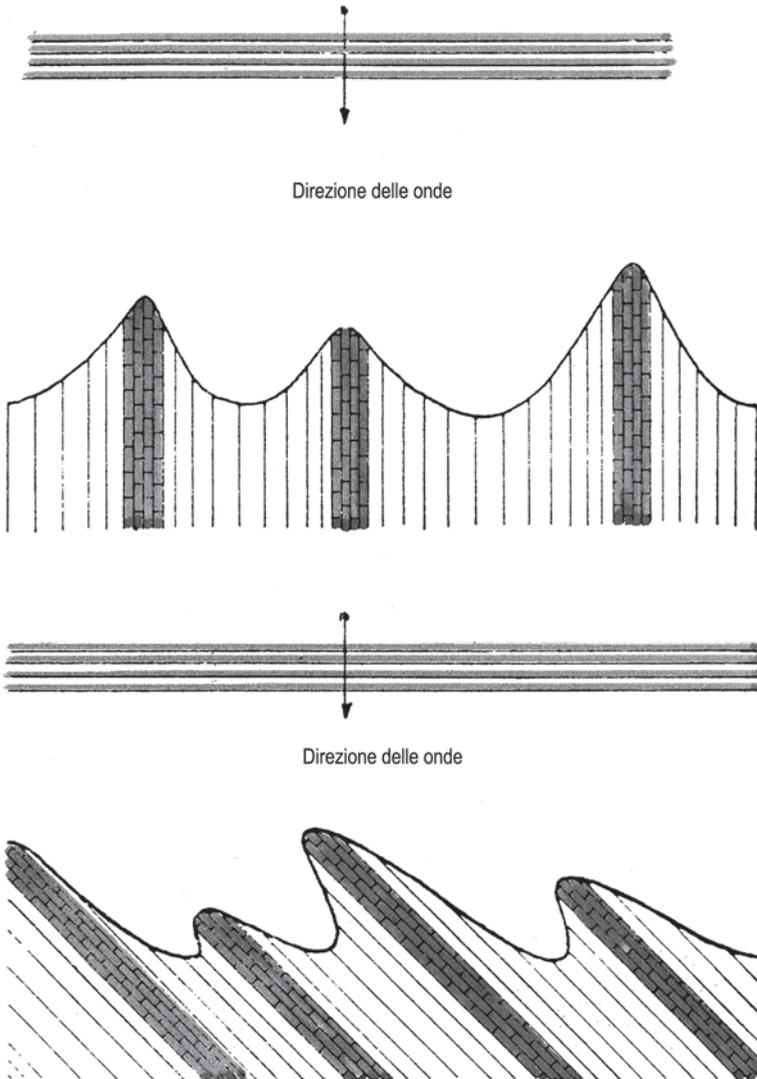


Figura 1.11. Evoluzione planimetrica di una costa con strati rocciosi (fonte: Scatena, 1967)

nomeni che si verificano su di essa e che danno luogo a quelle trasformazioni degli arenili che di fronte ad altri fenomeni della natura sono indubbiamente di minore entità, ma che per gli uomini assumono carattere di particolare importanza in relazione soprattutto alla gravità dei danni che essi provocano alle loro opere e alle loro proprietà.

Fenomeni analoghi si hanno anche nei riguardi dell'andamento longitudinale o planimetrico di una costa, che può essere rettilineo, quando la costa è di roccia uniformemente resistente oppure frastagliato, quando la roccia si presenta eterogenea, ed infine ondulato, quando comprende strati verticali o inclinati di resistenza non uguale.

In questo ultimo caso, le zone più sporgenti, che costituiscono le prominenze (punte, pro-

montori, ecc.) sono dovute agli strati più resistenti e le zone più arretrate, che formano le rientranze (insenature, ecc.), si hanno invece in corrispondenza degli strati più erodibili. A seconda poi che gli strati più resistenti sono perpendicolari o obliqui rispetto alla costa, si avranno prominente e insenature simmetriche o asimmetriche.

Tali condizioni sono state rappresentate nei due schizzi della figura 1.11.

1.3. I movimenti del mare

1.3.1. Le correnti marine e i moti di deriva dei mari italiani

In primo luogo va detto che gli spostamenti di acque, nel senso orizzontale, costituiscono le cosiddette *correnti marine*.

Le cause che le determinano sono molteplici e fra esse si enumerano:

- le differenze di temperatura tra zone dell'atmosfera sovrastanti diverse aree marine;
- la differenza di densità derivante dal diverso grado di salinità;
- le maree;
- i venti;
- il moto ondoso.

Poiché nel Mediterraneo le differenze di temperatura e di salinità sono minime, le correnti esistenti sono dovute prevalentemente alle altre cause.

Così, negli stretti e nei canali già citati, quali lo stretto di Messina e i canali di Otranto e di Sicilia, le correnti sono causate prevalentemente dalle maree, alle quali si aggiungono i venti che ne aumentano o diminuiscono la velocità, a seconda che il loro senso di movimento coincida o meno con quello delle masse d'acqua.

Mentre negli stretti interni del Mediterraneo, per la modesta differenza di salinità tra i mari adiacenti, le correnti di densità hanno scarsa importanza, negli stretti che mettono a contatto il Mediterraneo con gli altri mari – quali gli stretti di Gibilterra, dei Dardanelli, del Bosforo – si sviluppano forti correnti di densità a causa delle notevoli diversità delle percentuali di sale contenute nei vari mari.

Nello stretto di Gibilterra si ha una corrente superiore, di acque meno salate, che si muove nel senso dall'Atlantico al Mediterraneo, e una corrente inferiore, più salata, che si muove in senso contrario.

Le masse d'acqua, trasportate dalla prima corrente, seguono le coste africane, poi quelle del mare di Levante, quelle della Turchia e in parte quelle del Mar Ionio.

Va osservato che la presenza di questa corrente possiede un'influenza sui movimenti delle masse d'acqua dei mari italiani, nel senso che a essa sembra potersi attribuire la formazione delle correnti superficiali indicate nella cartina della figura 1.12, correnti però che sono caratterizzate da una natura instabile in relazione alle condizioni atmosferiche e al mutamento delle stagioni.

Nel mare Tirreno una corrente, distaccandosi a nord delle coste tunisine dalla corrente principale proveniente da Gibilterra, lambisce le coste settentrionali della Sicilia, poi quelle della Calabria, finché, all'altezza del golfo di Napoli, si ripartisce in due rami: un ramo raggiunge le coste meridionali della Sardegna e piegando al sud si chiude sulla corrente principale, formando il cosiddetto *circuito tirrenico*.

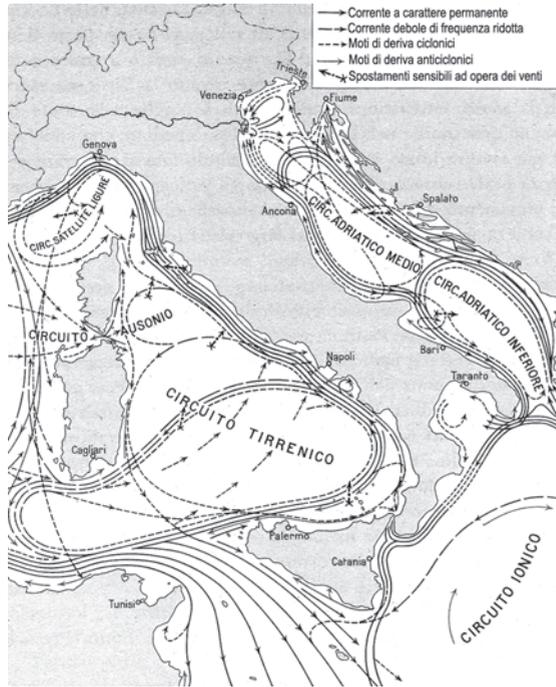


Figura 1.12
Le correnti marine e i moti di deriva dei mari italiani (fonte: Atlante Touring, 1957)

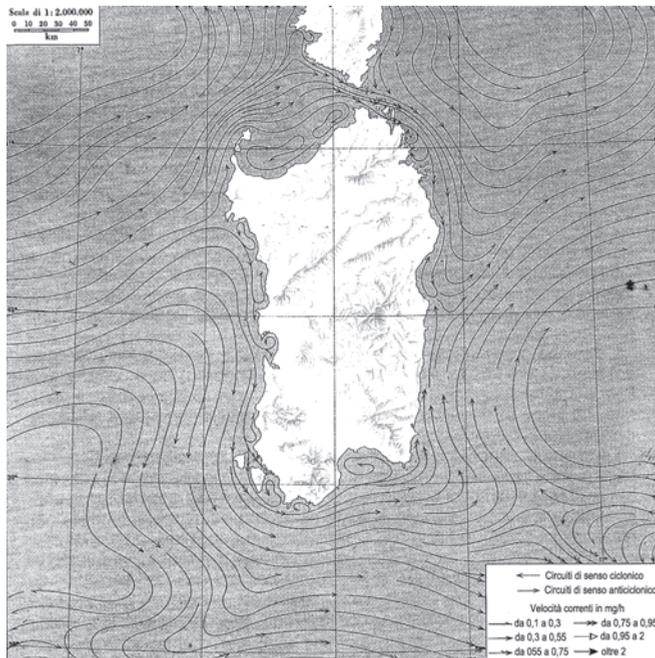


Figura 1.13. Le correnti marine e i moti di deriva dei mari sardi (fonte: Pracchi, 1971)

L'altro ramo prosegue lungo le coste italiane, che abbandona in corrispondenza della Costa Azzurra, dopo aver formato quello che viene chiamato *circuito satellite ligure*.

Oltre alle correnti di densità si hanno correnti determinate dai venti che assumono la caratteristica di correnti forzate, avendo circuiti simili a quelli dei venti che le causano. Se i venti hanno andamento stagionale, le correnti cambiano di direzione seguendo la direzione dei venti.

Quando lungo certe coste non si hanno venti regolari costanti, ma venti locali variabili, non si sviluppano correnti vere e proprie, ma movimenti irregolari che si dicono *moti di deriva* (figura 1.13).

Perché essi si verifichino è necessario che i venti abbiano velocità superiori a 25-30 km orari e abbiano una certa durata.

Il complesso delle correnti ora citate costituisce il sistema delle cosiddette *correnti litoranee* (*coastal currents*), che si svolge, nella maggior parte dei casi, parallelamente alla costa, al di fuori della zona dei frangenti, caratteristica del paraggio e in acque più profonde.

1.3.2. Le correnti marine indotte dal vento: calcolo dell'intensità

Il vento, per frizione sulla superficie del mare, mette in moto masse d'acqua enormi.

I dati a disposizione sulle correnti superficiali sono assai scarsi, mentre le misurazioni del vento sono rilevate con una rete ben diffusa in tutto il paese.

Ekman cercò per primo di stabilire (date la velocità e la durata del vento), pur con una certa approssimazione, la direzione, il verso e l'intensità della corrente superficiale.

Le grandezze di base sono:

y = direzione del vento W ; ϕ = angolo tra il vento e la direzione della corrente superficiale; Z = profondità (a partire dalla superficie).

Per profondità illimitata, come meglio precisato di seguito, l'angolo ϕ tra vento e corrente superficiale risulta teoricamente di 45° ruotato a destra nell'emisfero boreale.

Il primo a osservare questo fenomeno fu Nansen, durante il suo storico viaggio con la nave *Fram* al Polo Nord.

Egli osservò che il moto degli iceberg e dei ghiacci alla deriva non seguiva, in genere, la direzione del vento, ma era deviato a destra di un angolo variabile tra i 20° e i 40° .

L'intensità della corrente cala rapidamente scendendo al di sotto del livello del mare, con legge esponenziale:

$$e^{-(\pi Z/D)}$$

con

$Z \leq D$, la velocità profonda oltre D può essere trascurata se paragonata a quella superficiale, riducendosi a $1/23$ di quella

D = profondità di penetrazione dell'effetto del vento sul mare.

Ekman lo definì *frictional depth* e spesso viene definito come *fascia di Ekman*.

L'angolo tra la direzione del vento (ϕ) con quella della corrente cresce linearmente con la profondità ($\pi Z/D$), cosicché a una profondità $Z = 3D/4$ la direzione della corrente è di verso opposto a quella superficiale.

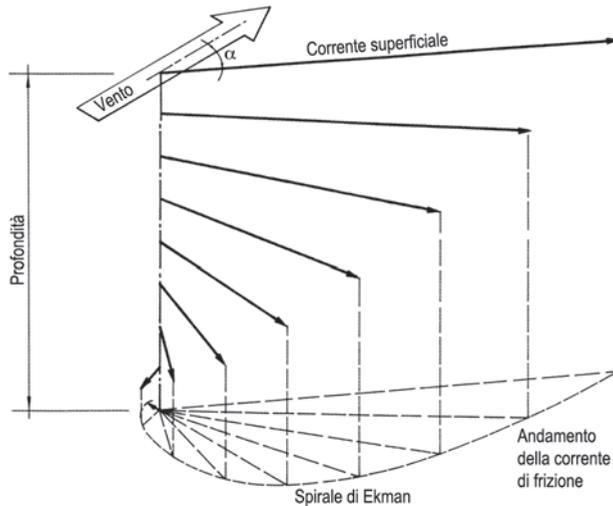


Figura 1.14. Andamento della corrente di frizione (fonte: Pocecco e Princi, 2006)

L'andamento di direzione e verso della corrente nella fascia di Ekman è riportato in figura 1.14.

Ekman calcolò il valore di D in via sperimentale per mare profondo:

$$D = 7,6 W / \sin \phi^{1/2}$$

dove

D = profondità in metri

W = velocità del vento in m/s.

L'angolo di rotazione (radianti) varia:

$$\phi_z = \phi + \pi Z/D$$

e la velocità della corrente decresce rispetto alla velocità superficiale V_0 :

$$V_z = V_0 e^{-(\pi Z/D)} \pi$$

Infine, per quanto riguarda V_0 si può dire che per i venti costanti che soffiano a lungo (più giorni) nella stessa direzione si può ritenere:

$$V_0 = (1/40 \div 1/50) W$$

Per brezze locali si può calcolare:

$$V_0 = (1/50 \div 1/100) W$$

1.3.3. Settore di traversia composto

In un tratto di costa avente l'andamento rappresentato nella figura 1.15, i venti che danno luogo alle più intense ondazioni in un punto qualsiasi della costa (ad esempio Diamante)

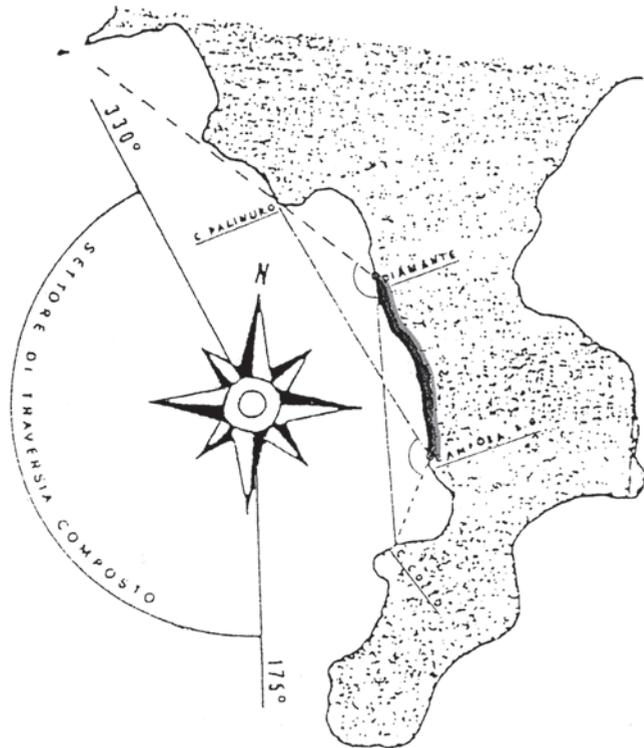


Figura 1.15
Settore di traversia composto
(fonte: Abruzzese, 1987)

provengono dal largo e sono compresi in un angolo avente il vertice in tale punto e i lati tangenti alle prominenze delimitanti il tratto di costa (ad esempio Capo Palinuro – Capo Collo).

In realtà, per le caratteristiche della costa nonché dei fondali adiacenti, non tutti i venti che soffiano in tale settore sono in grado di provocare le più forti mareggiate.

Queste si verificano per venti spiranti in una porzione di tale angolo che si definisce *setto-re di traversia* (viene così detto perché le mareggiate provenienti dalle direzioni comprese in esso tendono a gettare le navi in maniera trasversale alle coste).

Anche in questo settore, non tutti i venti agiscono con la stessa intensità, per cui il settore è diviso normalmente in due settori, quello di traversia principale o massima, contenente le direzioni dei venti che danno luogo ai mari più violenti e quello di traversia secondaria relativo ai mari meno violenti.

Con l'occasione si ritiene opportuno rilevare che, agli effetti pratici, il settore di traversia può essere preso in considerazione come mezzo di indagine puramente orientativo, in quanto, per il fenomeno di rifrazione dell'onda, che è dovuto all'influenza del fondo marino sulle onde, queste possono raggiungere la costa con direzioni di propagazione diversa da quella dei venti.

Naturalmente, gli effetti sulla costa delle mareggiate originate da questi venti sono diversi da punto a punto a causa della diversa incidenza dei venti stessi sulla costa dovuta al diverso orientamento del litorale nei singoli tratti, nonché a causa dell'azione, variabile

da zona a zona del litorale, esercitata dai fondali, per il fenomeno di rifrazione, sulla direzione delle onde, quando queste si avvicinano al litorale stesso.

Le caratteristiche del moto ondoso non subiscono delle grandi variazioni per corrispondenti variazioni anche di pochi gradi nella direzione del vento.

1.3.4. Calcolo del fetch effettivo

Secondo un metodo proposto dal Milano e di larga diffusione, tracciato il settore di traversa geografico per un determinato paraggio, si determina il cosiddetto *fetch* effettivo. Si tiene cioè conto del fatto che il vento trasmette energia sulla superficie del mare non solo nella sua direzione, ma anche in tutte le direzioni che formano con quelle del vento un certo angolo α , che si ritiene essere di 45° .

Milano ha ritenuto che la quantità di energia trasmessa dal vento secondo le varie direzioni fossero proporzionali al coseno dell'angolo α_i che le direzioni stesse formano con quelle del vento.

In base a quanto enunciato, Milano giunge alla seguente espressione della lunghezza del *fetch* effettivo per una generica direzione secondo cui soffia il vento:

$$F_{eff} = \sum x_i \cos^2 \alpha_i / \sum \cos^2 \alpha_i \quad (1.1)$$

dove

x_i = distesa di mare libero nella generica direzione.

Per poter applicare, nei casi pratici, la suddetta espressione, bisogna suddividere il settore di 90° (45° in senso orario e 45° in senso antiorario rispetto la direzione considerata – direzione del vento) in settori parziali di uguale ampiezza, ad esempio, di 5° (9 settori a destra e 9 a sinistra) e calcolare le due sommatorie che figurano nell'espressione, essendo x_i la lunghezza del *fetch* geografico secondo la generica direzione che delimita i settori parziali e α_i l'angolo di tale direzione con quella del vento.

I termini che compongono le sommatorie al numeratore sono nulli per direzioni non foranee, dove cioè $x_i = 0$.

Il citato autore osserva ancora che nel Mediterraneo si è constatato che anche in coincidenza delle più violente mareggiate, la lunghezza del *fetch* non supera mai i 400 km.

Questo comporta che nell'applicare la (1.1) il massimo valore di x che può aversi per una determinata direzione, formante un angolo α_i con quella del vento, è data dalla:

$$x = 400/2 \operatorname{sen} \alpha_i \text{ km} \quad (1.2)$$

Per cui nell'applicare la (1.1) si dovrà assumere per x :

- il *fetch* geografico se x è minore del valore ottenuto dalla (1.2);
- il valore ottenuto dalla (1.2) se x è maggiore.

Il *fetch* effettivo varia con continuità e non subisce, a differenza del *fetch* geografico, brusche variazioni per piccole variazioni angolari della direzione. Questo corrisponde proprio a ciò che si può osservare quasi a ogni mareggiata.

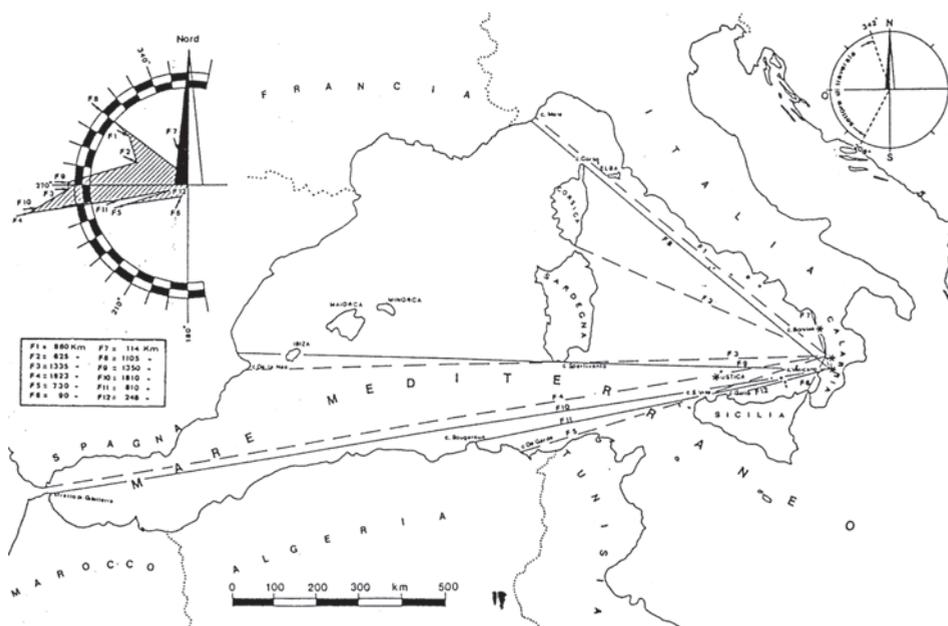


Figura 1.16. Definizione del settore di traversia del Golfo di S. Eufemia; si notino le grandi lunghezze di fetch (fonte: Cataldo, 1984)

1.3.5. Moto ondoso: definizioni

Di seguito si propongono alcune definizioni elementari sul moto ondoso:

- *onda*: rappresenta la superficie ondulata di un liquido;
- *cresta dell'onda*: è la parte dell'onda che raggiunge i punti più elevati.
- *cavo dell'onda*: è la parte dell'onda che rimane più depressa;
- *altezza d'onda*: è l'altezza che intercorre tra la cresta e il cavo dell'onda (H_z);
- *lunghezza d'onda*: è la distanza (orizzontale) tra due creste (L_z);
- *periodo*: è il tempo impiegato da due successive creste a transitare nello stesso punto (T);
- *velocità dell'onda*: è la velocità con cui si sposta l'onda lungo la superficie liquida;
- *acque profonde*: acque in cui il rapporto tra la profondità e la lunghezza d'onda $Z/L_z > 0,84$;
- *acque basse*: acque in cui il rapporto tra la profondità e la lunghezza d'onda $Z/L_z \leq 0,50$ e in cui il profilo dell'onda è modificato dalla presenza del basso fondale;
- *profondità di transizione*: profondità intermedia fra le due precedenti;
- *fetch*: distanza sulla superficie del mare sulla quale il vento ha soffiato per un certo periodo, generando il moto ondoso, e misurata nella direzione del vento;
- *frangente*: si ha il frangente quando un'onda diviene eccessivamente ripida e la cresta "frana" nel senso del moto, dissipando energia (figura 1.17).

Si osservi che il profilo longitudinale di un'onda può essere con buona approssimazione rappresentato da una particolare curva cicloide, detta *trocoide*.

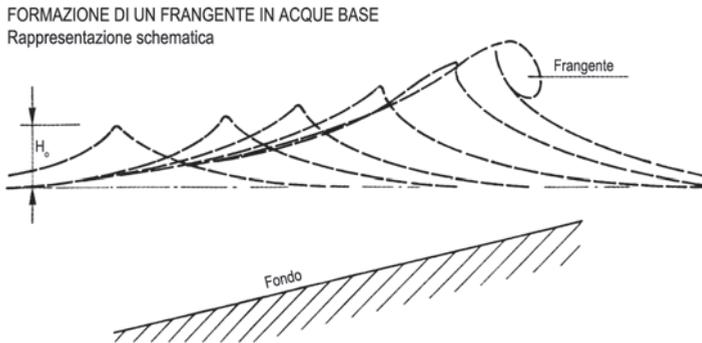


Figura 1.17. Formazione di un frangente in acque basse (fonte: Pocecco e Princi, 2006)

Nella sua forma matematica generale, essa è la curva descritta da un punto interno a un cerchio di rotolamento (a una distanza c dal centro, con $c < a$) che rotola senza strisciare su una retta.

La rappresentazione matematica della trocoide è:

$$x = at - c \operatorname{sent}$$

$$y = a - c \operatorname{cost}$$

che approssima bene il profilo delle onde reali.

Tra le varie grandezze che caratterizzano un'onda in acque profonde sussistono le seguenti relazioni:

$$C = L/T = (g L/2\pi)^{1/2} = g T/2\pi$$

$$L = 2\pi C^2/g = g T^2/2\pi$$

$$T = (2\pi L/g)^{1/2} = 2\pi C/g$$

dove

C = velocità di avanzamento dell'onda (m/s)

L = lunghezza d'onda (m)

T = periodo (s).

Non vi sono, come si può notare, relazioni che leghino l'altezza d'onda a lunghezza e periodo, essendo questi, entro certi limiti, indipendenti.

Si può comunque ritenere in genere che sia sempre:

$$H_s < 0,145 L$$

In acque profonde, al passaggio di un'onda, una singola molecola d'acqua descrive un moto, in prima approssimazione circolare, come descritto in figura 1.18. Quando l'onda raggiunge poi le acque basse, il moto circolare delle particelle liquide si schiaccia divenendo ellittico.

Il moto orbitale, anche in acque profonde, non ripete un cerchio perfetto come sinora indicato, ma ha in genere un lento movimento con la direzione delle onde (figura 1.18).

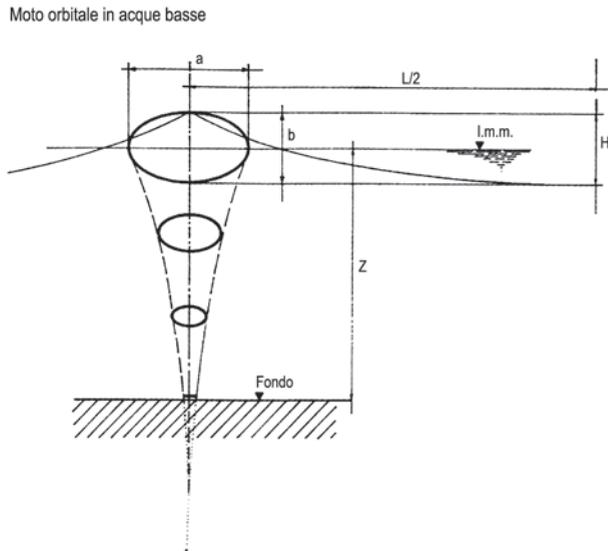


Figura 1.18
Moto orbitale in acque basse
(fonte: Pocecco e Princi, 2006)

1.3.6. Moto ondoso: onde di burrasca

Le onde, dal punto di vista che interessa in questa sede, possono essere divise in:

- onde di burrasca;
- onde morte.

Le prime sono generate da un forte vento e interessano l'intero *fetch*, le seconde rappresentano il moto ondoso residuo, a burrasca cessata o attenuata.

Lungo una direzione in cui soffia il vento le onde vanno progressivamente allungandosi e aumentano d'altezza, sino a che si raggiunge un equilibrio tra l'energia impressa dal vento e l'energia dissipata dai frangenti (non è il caso dell'onda che frange su una costa). Le onde a piccola lunghezza d'onda si formano rapidamente, mentre la loro "crescita" avviene sempre più lentamente. Anche la direzione in cui si muove il moto ondoso non è costante né sono paralleli i fronti d'acqua.

L'andamento dei fronti d'onda lungo tutto il *fetch* può essere schematicamente indicato come in figura 1.19.

Si osservi che, mentre le onde più corte possono essere sensibilmente deviate dalla direzione del vento, le onde lunghe lo sono molto meno. Tenuto conto che ciò che qui interessa, al fine del calcolo di stabilità delle opere di difesa costiere, sono le onde di burrasca, di tale deviazione si potrà non tenere conto.

È ora importante determinare quale sia l'onda da prendere in considerazione per la stabilità delle strutture marine da progettare.

Di norma si sceglie quale onda di riferimento l'onda caratteristica (*significant wave*). Questa viene definita come valore medio del terzo delle onde più alte ritenendo, come a oggi universalmente accettato, che la stabilità delle opere marittime, come pure del fondo marino costituito da sedimenti sabbiosi, venga condizionata dal ripetersi di onde con

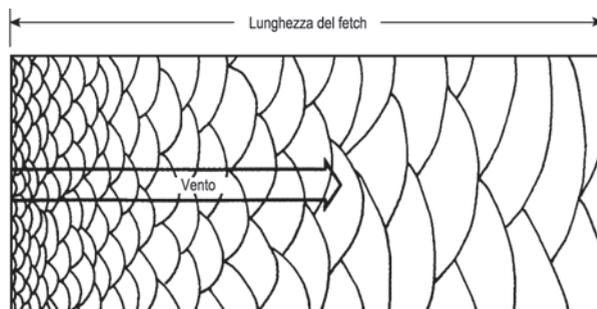


Figura 1.19
Andamento dei fronti d'onda lungo
il fetch (fonte: Pocecco e Princi, 2006)

eguali caratteristiche per tempi lunghi, piuttosto che da una singola onda, pur eccezionale, ma di azione istantanea.

Tra l'onda caratteristica e altre percentuali probabili di onde maggiori o minori sussiste (statisticamente) il seguente rapporto (detta H l'altezza dell'onda caratteristica):

- onda caratteristica 1,0 H ;
- onda media 0,6 H ;
- media del 10% delle onde più alte 1,3 H ;
- media dell'1% delle onde più alte 1,7 H .

1.3.7. Moto ondoso: previsione del vento di burrasca

La previsione dell'onda massima caratteristica in un paraggio viene effettuata di norma con calcolo statistico, sulla base delle registrazioni anemometriche nelle stazioni di rilevamento più vicine.

Certo, registrazioni sul posto con un ondometro sarebbero preferibili, ma la rarità di tali misure per periodi significativi di tempo, nonché la necessità di conoscere anche la direzione di provenienza del moto ondoso, consentono raramente di usare tali misure dirette. In Italia sono disponibili i dati relativi alle stazioni anemometriche dell'ITAV, di cui molte sono ubicate sulle coste in prossimità del mare o nell'immediato retroterra (2-3 km dal mare). È il caso di sottolineare che è bene però fare attenzione nell'uso di tali dati, in quanto la velocità del vento subisce in genere un apprezzabile incremento, a seconda dell'elevazione (Y) delle quote di misura rispetto a quelle effettuate a 10 m sul livello medio del mare (rapporto U_Y/U_{10}).

Il grafico riportato in figura 1.20 rende pratico il calcolo di tale variabilità.

Dai dati anemometrici disponibili si possono determinare per ciascuna direzione i massimi valori della velocità media del vento U e le corrispondenti durate t del vento stesso. In stretta analogia ad altre curve di possibilità climatica (come quelle di Fantoli per le piogge), si ammette che tra velocità media del vento e durata esiste la seguente relazione:

$$U = U_0 t^{-n}$$

con

U_0 = massimo valore della velocità del vento di durata di un'ora in un determinato periodo di osservazione

t = durata del vento espressa in ore

n = coefficiente di smorzamento.

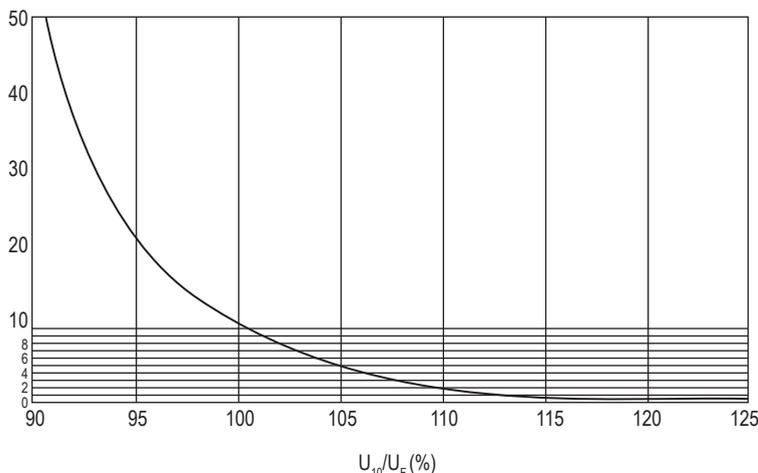


Figura 1.20. Andamento della variazione della velocità del vento a diverse altezze sul livello del mare (fonte: Pocecco e Princi, 2006)

Applicando poi gli usuali metodi statistici (Gumbel, Fuller Contague, ecc.), si possono stabilire i coefficienti della suddetta relazione per vari tempi di ritorno. In genere, questo viene scelto in base alla vita utile prevista per le opere di difesa marittime.

1.3.8. Moto ondoso: determinazione dell'onda caratteristica

Nel metodo di previsione elaborato da Sverdrup, Munk e Bretschneider, l'onda caratteristica massima prevedibile per un paraggio dipende non solo dall'intensità e dalla durata del vento, ma anche dall'area di mare libero in cui ha potuto formarsi, cioè dalla lunghezza del *fetch* (si veda paragrafo 1.3.4).

Noti quindi il *fetch* effettivo e le possibili durate della burrasca, con pochi rapidi tentativi si può determinare sul grafico di figura 1.21 l'onda caratteristica massima prevedibile nel tempo di ritorno assegnato.

Il grafico è stato costruito secondo il metodo meglio conosciuto come SMB, che rappresenta le iniziali degli autori: Sverdrup, Munk e Bretschneider.

Altri metodi sono stati sviluppati; tra questi si ricorda il metodo PNJ, derivato da elaborazioni statistiche di numerose osservazioni. Questo sistema di calcolo è anche conosciuto come metodo del trasferimento di energia.

Secondo successive elaborazioni di Pearson:

$$T_{\max} = 2 \pi U / (3/2g)^{1/2}$$

che può essere ridotta:

$$U / C T_{\max} = (3/2)^{1/2} = 1,22$$

e ancora:

$$H/T^2 = \exp [-(g T/2 \pi U)^2]$$

$$H/T^2 = \exp [-(C/U)^2]$$

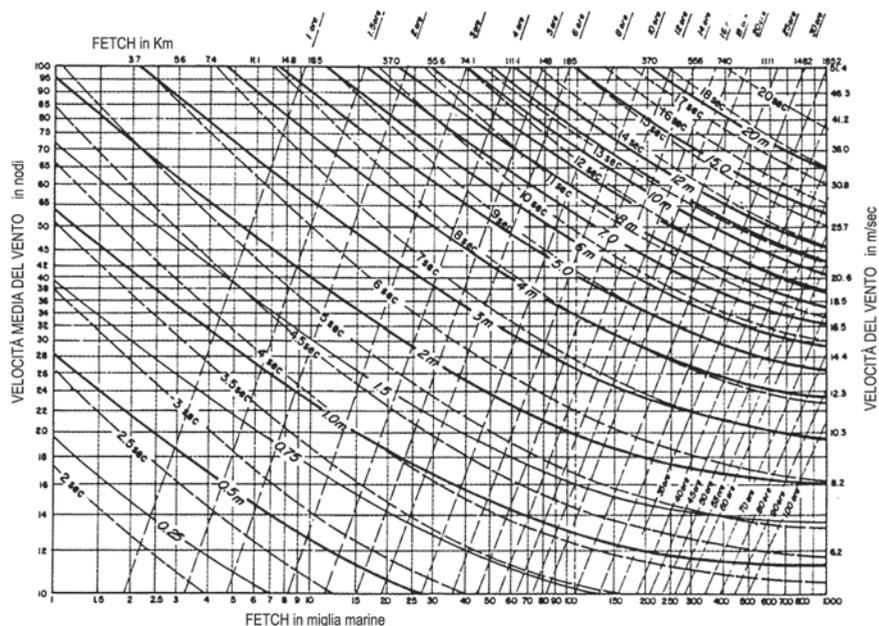


Figura 1.21. Previsione dell'onda caratteristica in funzione del fetch, velocità e durata del vento (fonte: Sverdrup, Munk, Bretschneider, 1970)

1.3.9. Moto ondosio: ingressione del mare

La metodologia sviluppata per prevedere l'ingressione del mare si compone di due fasi successive: la determinazione della massima risalita verticale dell'onda rispetto alla riva (*run-up*) e la valutazione della propagazione dell'inondazione sulla terraferma.

La modellazione sviluppata si basa sulle seguenti sette ipotesi:

1. l'onda è schematizzata come un'onda rettangolare identificata solamente mediante la prima cresta;
2. la prima onda è considerata la più distruttiva;
3. gli effetti di riflusso sono considerati nulli;
4. il fronte d'onda è parallelo alla linea di costa in ogni suo punto;
5. l'altezza d'onda non subisce incrementi in presenza di baie o stretti;
6. tutta l'energia dell'onda incidente la costa si trasforma istantaneamente in energia potenziale;
7. la perdita di energia che la massa d'onda subisce durante la propagazione sulla costa è trascurabile.

Sebbene l'ipotesi (l'energia dell'onda incidente la costa si trasforma istantaneamente in energia potenziale) sia abbastanza semplificativa, poiché in realtà la trasformazione dell'energia cinetica in energia potenziale durante la propagazione dell'acqua sul territorio avviene in modo graduale, questa permette di facilitare notevolmente i calcoli. È inoltre da sottolineare come questa ipotesi sia cautelativa, in quanto il valore di inondazione trovato sarà sicuramente maggiore di quello reale.

Sulla base delle ipotesi illustrate il *run-up* è valutato come:

$$R_u = H + z_{max} \tag{1.3}$$

dove

H = altezza d'onda a riva

z_{max} = massimo soprizzo raggiunto dall'acqua rispetto all'altezza d'onda.

Il valore di H viene determinato considerando il processo di *shoaling*, che riproduce la variazione dell'altezza d'onda al diminuire della profondità; in particolare viene adottata la legge di Green:

$$H = H_0 (h_0/h)^{1/4} \tag{1.4}$$

dove

H_0 = altezza d'onda

h_0 = profondità del mare nel punto in cui si è generata l'onda

h = profondità in corrispondenza della costa.

Il valore di z_{max} viene calcolato tramite la seguente equazione:

$$z_{max} = [U^2 / 2g \tan \alpha (L + H / 2 \tan \alpha)]^{1/2} \tag{1.5}$$

dove la velocità dell'onda a riva valutata localmente in corrispondenza della cresta (U) e la lunghezza di un'onda solitaria tagliata in modo da identificare una lunghezza finita (L) derivano dalle seguenti equazioni:

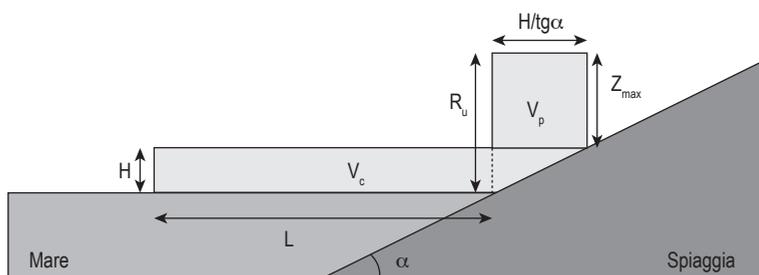


Figura 1.22. Schematizzazione del fenomeno di run-up (fonte: Federici, 2007)

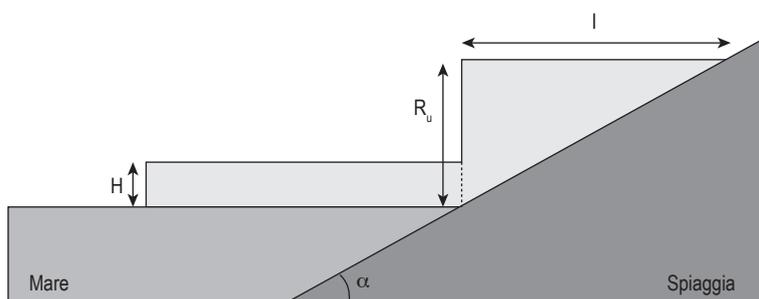


Figura 1.23. Schematizzazione del processo di inondazione (fonte: Federici, 2007)

$$U = c_0 (1 + H/h)^{1/2} \quad (1.6)$$

$$L = 4q^* h/(3H/h)^{1/2} \quad (1.7)$$

essendo la celerità dell'onda $c_0 = gh^{1/2}$

e

$$q^* = 2,415$$

Osservando le equazioni (1.5), (1.6) e (1.7) si può notare come il *run-up* sia funzione dell'altezza d'onda incidente a riva H e della pendenza α del tratto di costa dove l'onda va a impattare.

Una volta calcolato il *run-up*, si procede alla valutazione dell'inondazione. In base all'ipotesi 7, anch'essa cautelativa, è possibile schematizzare il processo così come raffigurato in figura 1.23, dove l'onda, raggiunta la sua massima altezza, mantiene la posizione di pelo libero orizzontale.

L'estensione della zona inondata I può essere valutata puntualmente tramite l'equazione:

$$I = \varepsilon x R_U - e \quad (1.8)$$

L'equazione (1.8) esprime la dipendenza di I dai valori di *run-up*, di elevazione (e) e da un coefficiente di scabrezza (ε). In particolare ε permette di tener conto dell'effetto di attenuazione, dovuto all'attrito opposto dal terreno, che l'altezza d'onda subisce lungo la sua diffusione sulla terraferma. Tale indice sarà quindi differente per diversi utilizzi del suolo.

1.3.10. Il fenomeno di rifrazione dell'onda

Si consideri un treno di onde che si avvicini a terra, con fronte obliquo rispetto alla riva e su fondali che possano identificarsi con un piano inclinato (batimetriche all'incirca parallele alla riva).

L'estremità dell'onda più vicina a terra, giungendo per prima su bassi fondali, viene ritardata per l'azione del fondo, mentre la rimanente parte può avanzare con maggiore velocità, attraversando acque più profonde.

Il ritardo si propaga lentamente sino all'altra estremità dell'onda, mano a mano che le creste avanzano, di modo che le onde tenderanno a ruotare intorno alla prima estremità e a disporsi quasi parallelamente alla riva (figura 1.24).

Si tenta presente che le onde più basse sono soggette a maggior rifrazione rispetto a quelle più ripide.

L'esempio sopra considerato rappresenta un caso elementare di rifrazione, a causa della supposizione che il fondale sia piano.

Normalmente i fondali, nelle vicinanze della costa, hanno invece un andamento del tutto irregolare, presentando zone meno profonde e zone più profonde che, nel caso abbiano forma oblunga, possono essere disposte obliquamente e, spesso, trasversalmente alla costa.

Le onde, nelle zone meno profonde, sentiranno l'azione ritardatrice del fondale prima e, in quelle più profonde, dopo; di conseguenza, i tratti di onde sovrastanti le prime ritarderanno e quelli sovrastanti le zone più profonde accelereranno.