



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAMERINO

SCUOLA DI ARCHITETTURA E DESIGN “E. VITTORIA”

CORSO DI LAUREA IN

Design per l'Innovazione Digitale - LM12

TITOLO DELLA TESI

SISTEMA MODULARE SITE-SPECIFIC:

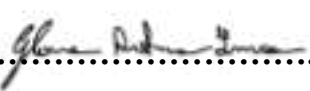
DESIGN COMPUTAZIONALE PER LA DIFESA COSTIERA

Parametrizzazione di indici territoriali per matrici a densità variabile

implementate mediante processi di 3DCP

Laureando/a

Nome... Gloria Artino Innaria...

Firma... 

Relatore

Nome... Davide Paciotti.....

Firma... 

Se presente eventuale Correlatore indicarne nominativo/i

Pierluigi Antonini

Roberto Cognoli

ANNO ACCADEMICO

2024/2025

ABSTRACT

La presente ricerca affronta la problematica dell'erosione costiera attraverso lo sviluppo di un sistema di difesa innovativo basato su una metodologia di progettazione sistemica e computazionale. L'obiettivo centrale è lo sviluppo di un protocollo generativo capace di tradurre le relazioni spaziali e le variabili ambientali del sito in configurazioni morfologiche differenziate, ottimizzate per la dissipazione energetica del moto ondoso.

Il fulcro del lavoro risiede nella formulazione di una matrice geospaziale di sensibilità parametrica: un sistema algoritmico concepito per processare indici territoriali complessi, quali la prossimità alle infrastrutture, l'apporto sedimentario dei corsi d'acqua, vincoli normativi o la direzione dei venti. In questo processo, il litorale di Sant'Agata di Militello viene assunto come area territoriale di riferimento per l'estrazione e l'analisi di questi fattori. Lo studio delle sue dinamiche litoranee, delle interazioni con i torrenti Inganno e Rosmarino e dell'idrodinamica nella zona portuale, ha permesso di definire le regole logiche che determinano la variazione formale di una serie di blocchi. L'impiego della fabbricazione digitale tramite stampa 3D in calcestruzzo (3DCP) permette di declinare questa complessità in una produzione deserializzata, dove ogni modulo costituisce una geometria unica ottimizzata per le specifiche condizioni batimetriche e idrodinamiche del punto di posa.

In questo contesto, l'ecologia emerge come un fondamentale valore aggiunto in quanto, le texture e le cavità originate per massimizzare la rugosità e la dissipazione diventano, nel tempo, un substrato favorevole alla colonizzazione da parte della fauna marina del luogo, promuovendo la ricolonizzazione biologica e la creazione di nuovi micro-habitat marini.

Il risultato è una metodologia d'intervento site-specific che ridefinisce il rapporto tra artificio tecnologico e dinamiche naturali, proponendo una sintesi evolutiva tra protezione del territorio e integrazione ecosistemica.

INTRODUZIONE

Contesto

Obbiettivi

Metodologia

1

CAPITOLO 1

EROSIONE COSTIERA

5

1.1 MORFOLOGIA COSTIERA

6

1.1.1 Classificazione delle coste

8

1.1.2 Spiaggia

9

1.1.3 Sedimenti

12

1.1.4 Sistema dunale e vegetazione

14

1.2 DINAMICA LITORANEA E PROCESSO EROSIVO

16

1.2.1 Azione eolica sul mare

16

1.2.2 Clima meteomarino in Italia

19

1.2.3 Genesi del moto ondoso

20

1.2.4 Le maree

22

1.2.5 Dinamica delle onde

24

1.2.6 Trasporto solido

27

1.2.7 Fenomeno erosivo

28

1.2.7 Instabilità costiera globale

31

1.3 VALUTAZIONE DEL RISCHIO

32

1.4 MODALITÀ DI MITIGAZIONE

40

1.4.1 Opere di difesa soft

41

1.4.2 Opere Di Difesa Hard

44

1.4.3 Analisi comparativa

61

1.5 QUADRO NORMATIVO E GESTIONALE

62

1.5.1 Competenze amministrative sul demanio

62

1.5.2 Pianificazione territoriale e mitigazione

63

1.5.3 Quadro dei finanziamenti

65

CAPITOLO 2

SANT'AGATA MILITELLO

67

2.1 CASO STUDIO TERRITORIALE

68

2.1.1 Inquadramento nazionale

69

2.1.2 Litorale siculo

72

2.1.3 Sant'Agata di Militello

77

Venti agenti sul territorio di Sant'Agata Militello

2.1.4 Dinamica costiera Sant'agata di Militello

82

Confronto della distanza dell'isobata dei -50 m

Storico degli eventi meteomarini e impatti sul litorale

Correlazione tra eventi meteo-marini estremi e vulnerabilità del litorale

Principali azioni di contrasto all'erosione costiera

Reportage fotografico

CAPITOLO 3

SVILUPPO PROGETTUALE

107

Definizione del sistema

107

3.1 DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

108

3.2 STATO DELL'ARTE E SOLUZIONI DI SETTORE

110

MANGROVIE

3.2.1 Nature based-solutions

114

MANGROVE REEF WALLS

LIVING SEAWALLS e KIND DESIGNS

3.2.2 Rigenerazione ecosistemica

116

MARS - MODULAR ARTIFICIAL REEF STRUCTURE

UNDERWATER SCULPTURE	
ARCHIREEF	
REEFINE	
3DPARE	
EMU - Erosion Mitigation Units	
3.2.3 Difesa costiera strutturale	123
TETRAPOT	
COASTLOCK	
XBLOC PLUS e XSTONE	
3.3 RACCOLTA BREVETTUALE	128
3.4 CONCEPT	142
Matrice geospaziale: lettura parametrica del territorio	
Open blocks: dissipazione energetica ed ecologia marina	
Fabbricazione additiva: dalla matrice al manufatto	
3.5 FRAMEWORK METODOLOGICO DEL SISTEMA GENERATIVO	144
Scala territoriale – sistema generativo costiero	
Scala del modulo – morfologia parametrica	
Scala costruttiva – sistema modulare e fabbricazione	
3.6 REQUISITI PROGETTUALI	146
3.7 GENESI MORFOLOGICA	148
3.8 INDICI DI VARIABILITÀ	152
3.2.3 Catalogazione e influenza dei parametri di progetto	153
CAPITOLO 4	
SVILUPPO COMPUTAZIONALE	157
PARAMETRIZZAZIONE DEL PROGETTO	157
4.1 SVILUPPO MATRICE GEOSPAZIALE	158
Algoritmo generativo matrice geospaziale - Grasshopper	
MATRICE GEOSPAZIALE	
FOCUS ZONA FOCE TORRENTE ROSMARINO	
FOCUS ZONA INFRASTRUTTURA PORTUALE	
FOCUS ZONA BALNEABILE	
4.2 SVILUPPO MORFOLOGICO	166
4.2.1 Alterazione della geometria base	167
Algoritmo generativo curva base - Grasshopper	
4.2.2 Dataset morfotipologico	170
4.3 VARIAZIONE MORFOLOGICA PARAMETRICA	176
SOTTO-MATRICE DINAMICHE SEDIMENTARIE	
SOTTO-MATRICE FAUNA	
Scheda tecnica elemento	

4.5 ANALISI DIMENSIONALE	184
4.6	186
CAPITOLO 5	
PRODUZIONE E PROTOTIPAZIONE	189
Manifattura additiva come necessità progettuale	189
5.1 TECNOLOGIA DI PRODUZIONE	190
5.1.2 3D concrete printing	191
5.1.3 Calcestruzzo marino	194
5.2 PROTOTIPAZIONE IN LABORATORIO	196
5.2.1 Generazione g-code	196
5.2.2 Preparazione materia e setup di stampa	198
5.2.3 Sperimentazione	200
PROVA 01_curva1	
PROVA 02_curva2	
PROVA 03_curva3	
PROVA 04_curva30	
PROVA 05_curva3	
PROVA 06_curva30	
PROVA 07_curva30	
PROVA 08_curva28	
PROVA 09_curva06	
PROVA 09_curva28	
PROVA 10_curva15	
UGELLO	1.2mm
PROVA 11_curva27	
UGELLO	1.2mm
5.3 PROTOTIPAZIONE IN AZIENDA	215
5.3.1 Centauroos	215
RIFERIMENTI	222



Contesto

L'ecosistema costiero globale e nazionale si trova oggi di fronte a una grave crisi ambientale e morfologica. L'erosione costiera, drasticamente accelerata dai cambiamenti climatici, dall'innalzamento eustatico del livello del mare e dall'incremento nella frequenza e nell'intensità delle mareggiate estreme, rappresenta un'emergenza territoriale che minaccia gli ecosistemi naturali e le attività umane. La rilevanza di questa ricerca oggi risiede nella necessità di integrare e superare gli approcci ingegneristici tradizionali, esplorando soluzioni alternative in grado di assecondare con maggiore flessibilità la natura dinamica e complessa delle unità fisiografiche marine. Per decenni, la risposta all'arretramento della linea di riva si è basata su interventi di difesa passiva, definiti come opere rigide o di hard engineering (moli, frangiflutti, scogliere aderenti) che opponendo una resistenza fisica massiva all'energia delle onde, innescano profonde alterazioni dell'idrodinamica locale. La loro presenza agisce come una barriera che intercetta e blocca il naturale trasporto solido longitudinale, generando frequentemente fenomeni di grave erosione sottoflutto. Questo trasferimento del deficit sedimentario verso i tratti di costa adiacenti non risolve il problema alla radice, ma lo sposta spazialmente, provocando in molti casi la progressiva scomparsa della fascia sabbiosa intertidale (fenomeno del coastal squeeze).

In questo panorama, il litorale di Sant'Agata di Militello emerge come un caso studio territoriale emblematico per testare un nuovo sistema costiero avanzato. Questo tratto della costa tirrenica messinese presenta una combinazione di fattori critici estremamente complessi: la massiccia presenza dell'infrastruttura portuale, la delicata interazione con l'idrografia locale determinata dagli sbocchi dei torrenti Inganno e Rosmarino, e l'esistenza di una vulnerabile zona balneabile a ridosso dell'espansione urbana. In quest'area, il moto ondoso prevalente indotto dai venti di Maestrale genera una costante spinta cinetica che minaccia di insabbiare le foci fluviali e di scalzare le opere infrastrutturali attraverso l'energia delle onde riflesse. Si delinea così un problema concreto e urgente: la necessità di proteggere un fronte antropizzato senza distruggere i flussi sedimentari vitali per l'equilibrio della costa.

Obiettivi

La presente ricerca si pone l'obiettivo di attuare un radicale cambio di paradigma nella concezione delle infrastrutture marittime: transitare da un obsoleto modello di resistenza fisica a un sistema di dissipazione energetica selettiva e di adattamento morfologico. Lo scopo è dimostrare che l'opera di difesa deve essere concepita come un dispositivo idrodinamico ed ecologico, capace di operare in sinergia con i processi naturali per ristabilire un bilancio sedimentario virtuoso, lavorando in sinergia con eventuali interventi di ripascimento costiero, e rigenerare la flora e la fauna.

Il problema concreto che questo studio risolve è la frammentazione dell'energia distruttiva delle onde preservando la permeabilità del litorale. A questo scopo viene introdotto il paradigma degli blocchi aperti inteso come un sistema variabile a adattivo di moduli porosi e aperti che consentono la permeabilità dell'acqua e dei detriti, abbattendo l'energia cinetica senza occludere il naturale ricambio idrico.

La ricerca mira a indagare e dimostrare i seguenti obiettivi specifici:

- › sviluppare un sistema adattivo che superi la standardizzazione industriale in favore di una produzione deserializzata, in cui la morfologia di ogni blocco è determinata dall'esatta coordinata spaziale che esso occupa.
- › trasformare l'intervento infrastrutturale in una matrice di micro-habitat, dove le variazioni volumetriche e i vuoti interni favoriscano la colonizzazione bentonica e ittica, convertendo l'opera in un vero e proprio reef artificiale.
- › risolvere il rischio di insabbiamento del deflusso fluviale, calibrando la porosità degli elementi in prossimità delle foci per garantire un continuo scambio idraulico tra il torrente e il mare.

A supporto di tali obiettivi, l'indagine si articola attorno a tre filoni di ricerca fondamentali e interconnessi. Il primo riguarda la traduzione parametrica dei dati ambientali, volta ad analizzare in che modo gli indici topografici e marini possano essere convertiti in parametri numerici capaci di generare in modo automatico la morfologia della difesa costiera. Il secondo filone si concentra sull'ottimizzazione della porosità strutturale, al fine di determinare il rapporto ottimale tra pieni e vuoti con l'intento di massimizzare la dissipazione del moto ondoso, garantendo il libero passaggio del carico sospeso di sedimenti e la corretta colonizzazione da parte delle specie marine. Infine, l'ultimo ambito di indagine affronta la riconversione dei vincoli tecnologici, puntando a sovvertire le limitazioni intrinseche del processo di fabbricazione additiva per trasformarle in diretti vantaggi operativi ed ecologici per l'ecosistema sottomarino.

Metodologia

L'apporto innovativo della ricerca si concretizza in un processo metodologico multiscalare che fonde per l'analisi dei dati territoriali, il design computazionale parametrico e la tecnica della fabbricazione additiva applicata all'ambiente marino (3D Concrete Printing). L'approccio metodologico è strutturato su tre livelli operativi interconnessi: la scala territoriale, la scala del modulo e la scala costruttiva.

Alla scala territoriale, il processo prende avvio nell'ambiente algoritmico di Grasshopper (Rhinceros) con la creazione di una Matrice Geospaziale di Sensibilità Parametrica, in cui l'area costiera viene letta come un campo di forze. Per definire la configurazione spaziale, le dimensioni e la sagoma dei blocchi, il sistema elabora indici ambientali specifici dell'area in esame che diventano fattori numerici elaborati tramite la logica degli attrattori e comprendono:

- la distanza dall'infrastruttura portuale per calibrare l'assetto dei moduli al fine di mitigare l'energia delle onde riflesse;
- la vicinanza agli sbocchi fluviali per calibrare la porosità del sistema e non ostacolare il naturale apporto sedimentario;
- la prossimità alla zona balneabile per la definizione delle aree di esclusione dell'intervento, in stretta osservanza dei vincoli normativi e di sicurezza;
- la batimetria del fondale come indicatore semplificato impiegato per guidare l'adattamento ecosistemico e strutturale dei blocchi alle diverse profondità marine;

- l'influenza della direzione dei venti prevalenti come indicatore semplificato per definire l'orientamento principale del moto ondoso e ottimizzare la configurazione dissipativa.

Alla scala del singolo modulo, l'algoritmo traduce questi indici nella geometria del manufatto, rendendola l'esito di una complessa iterazione informata dai gradienti spaziali. È importante sottolineare che il sistema è progettato per integrare un numero virtualmente illimitato di variabili (n indici morfologici e ambientali). Questi molteplici parametri si influenzano vicendevolmente all'interno dell'ambiente computazionale, calibrando in modo dinamico la configurazione ottimale tra pieni e vuoti per ogni singola posizione. Nelle aree soggette a un intenso transito di sedimenti, il sistema accresce la dimensione delle cavità interne, incrementando la percentuale di vuoti per assecondare la corrente litoranea. Nelle zone batimetriche meno profonde, i blocchi mutano verso un assetto più massivo con anfratti ristretti per fungere da tane per la fauna bentonica. Si ottiene così una serie deserializzata, in cui ogni singolo elemento è geometricamente unico pur appartenendo a un linguaggio morfologico coerente.

Infine, alla scala costruttiva, vengono analizzati e risolti i vincoli tecnologici intrinseci della manifattura additiva. La stampa 3D, infatti, operando per deposizione verticale di materiale strato su strato, è fortemente limitata dagli angoli di sbalzo e dal rischio di collasso gravitazionale. Per far fronte a questo limite, l'algoritmo è stato impostato per generare esclusivamente forme autoportanti e prive di sbalzi critici, garantendo la totale stabilità del manufatto durante il processo di estrusione. Questa scelta morfologica è stata affiancata da un'ulteriore intuizione procedurale che supera la direzionalità della stampa: un'inversione degli assi tra la fase di produzione e la fase di posa in opera. L'elemento viene estruso in piano sul letto di stampa, generando dei condotti verticali; successivamente, al momento dell'installazione in mare, il blocco viene ruotato di 90 gradi. Grazie a questo espediente geometrico, i condotti si trasformano in gallerie orizzontali deputate alla frammentazione dell'onda e la peculiare micro-rugosità superficiale, derivante dal passaggio dell'ugello della macchina, non viene trattata come un difetto, bensì valorizzata ecologicamente, fungendo da substrato ideale per l'attecchimento e la colonizzazione biologica.

1.1.







Gli elementi

<



<

