



**Politecnico  
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea Ottobre 2023

**I Formicai:  
Ispirazioni biomimetiche  
per le Infrastrutture**

Relatore:

Prof. Chiaia Bernardino

Candidata:

Marcario Eleonora



## Sommario

---

1	Introduzione.....	3
1.1	Contestualizzazione dell'argomento .....	3
1.2	Scopo e obiettivi della tesi.....	4
2	Principi di biomimetica .....	6
2.1	Applicazioni della biomimetica all'ingegneria civile.....	6
2.2	Vantaggi dell'applicazione dei principi dei formicai nella costruzione di tunnel.....	13
3	Analisi dei formicai .....	16
3.1	Studio delle caratteristiche strutturali dei formicai.....	16
3.1.1	Geometria, disposizione delle camere e dei tunnel .....	18
3.1.2	Materiali .....	21
3.1.3	Ventilazione .....	21
3.2	Processo costruttivo dei formicai.....	22
3.2.1	Stabilità dei formicai .....	26
3.2.2	Tempi di costruzione e costo dello scavo .....	27
4	Applicazione dei principi biomimetici nella costruzione di tunnel.....	30
4.1	Progettazione e pianificazione.....	30
4.2	Metodologia di scavo.....	32
4.2.1	Metodo Dill & Blast.....	33
4.2.2	Metodi meccanizzati .....	35
4.3	Stabilizzazione del tunnel e materiali .....	39
4.3.1	Meccanismo di rottura del fronte del tunnel .....	42
4.4	Sistema di ventilazione nei tunnel .....	53
4.5	Costi e tempi di realizzazione.....	56
5	Analisi topologica tramite la Teoria dei Grafi.....	58
5.1	Concetti fondamentali della Teoria dei Grafi .....	58

5.2	Applicazione della Teoria dei Grafi alla struttura dei formicai .....	60
5.3	Applicazione della Teoria dei Grafi alla topologia delle linee metropolitane.....	62
5.3.1	Metropolitana di Londra .....	63
5.3.2	Metropolitana di Parigi .....	77
5.4	Confronto e Analogie tra Metropolitane e Formicai .....	89
6	Conclusioni.....	92
7	Bibliografia.....	96
8	Sitografia .....	100
9	Indice delle figure.....	101
10	Indice tabelle.....	103

# 1 Introduzione

---

## 1.1 Contestualizzazione dell'argomento

L'ingegneria civile ricopre un ruolo fondamentale nello sviluppo e nella costruzione delle infrastrutture necessarie per sostenere l'aumento delle esigenze delle società moderne. Tuttavia, l'approccio tradizionale di progettazione e costruzione sta affrontando sfide sempre più complesse. Si valutano infatti soluzioni innovative, sostenibili ed efficienti e questo ha portato a utilizzare nuovi approcci ispirati alla natura. A questo scopo la biomimetica si propone come un campo di ricerca innovativo poiché trae ispirazione dai processi, dai modelli e dalle strutture presenti nella natura per affrontare le sfide ingegneristiche.

La biomimetica si occupa di imitare e riprodurre idee, processi e soluzioni naturali nel mondo artificiale. A partire dalla comprensione e dalla applicazione dei principi fondamentali che dominano i meccanismi degli organismi viventi e degli ecosistemi, si cercano soluzioni innovative che migliorino l'efficienza e la sostenibilità delle strutture e infrastrutture nell'ambito dell'ingegneria civile. Le soluzioni ricavate tramite l'applicazione dei principi della biomimetica risultano essere in armonia con l'ambiente circostante permettendo molto spesso una riduzione dell'impatto ambientale consentendo anche una ottimizzazione delle risorse. Queste soluzioni, inoltre, spingono l'utilizzo di approcci che coinvolgono diverse figure professionali come ingegneri, scienziati e biologi.

L'analisi dei formicai si è dimostrata di particolare interesse per l'ingegneria civile, infatti, analizzando le colonie delle formiche si evince che queste sono capaci di costruire strutture complesse che resistono a carichi significativi e che si adattano all'ambiente circostante. Proprio a partire dall'osservazione delle azioni e del processo di costruzione dei nidi delle formiche si possono individuare degli spunti per perfezionare sia il processo di progettazione e di costruzione, sia le prestazioni dei tunnel sotterranei. Difatti, la disposizione delle camere all'interno del formicaio suggerisce un layout che apporta vantaggi notevoli nella fase di ottimizzazione delle connessioni nei tunnel di gallerie sotterranee in fase di progetto.

## **1.2 Scopo e obiettivi della tesi**

L'obiettivo generale di questo elaborato è quello di esplorare le potenzialità della biomimetica per migliorare le prestazioni dei tunnel delle infrastrutture di trasporto sotterraneo attraverso l'adattamento di principi e strategie presenti nella natura.

L'obiettivo principale di questa tesi di laurea magistrale è quello di approfondire l'applicazione della biomimetica nella progettazione di tunnel, concentrandosi sull'analisi dei formicai e del loro processo costruttivo come fonte di ispirazione.

Le colonie di formiche sono in grado di realizzare delle strutture complicate che possono resistere a carichi significativi e che possono adattarsi all'ambiente circostante. Verranno analizzate le caratteristiche strutturali dei formicai come la geometria, la distribuzione delle camere, i collegamenti e i materiali utilizzati per evidenziare i principi di ingegneria che guidano il processo di costruzione dei nidi delle formiche. Il processo di costruzione ed espansione del formicaio nel tempo tramite la rimozione di elementi dal suolo, inoltre, risulta influenzato dalla numerosità della colonia, dalla presenza di acqua nel terreno e dall'umidità dell'aria e da come questa circola all'interno delle camere e dei tunnel.

Successivamente, si cercherà di valutare le possibili analogie tra i principi di progettazione e di costruzione dei tunnel sotterranei e l'applicazione di strategie biomimetiche che imitano la natura per ottimizzare i processi di scavo e per migliorare la geometria strutturale e per realizzare dei sistemi di connessione efficienti. Verranno analizzate le varie tecniche di scavo e la variazione delle prestazioni, verrà considerata la possibilità di rottura del fronte di scavo durante le operazioni di rimozione del terreno.

Un'ulteriore valutazione consisterà nella comparazione tra la topologia delle metropolitane di Londra e Parigi e la geometria in pianta dei formicai utilizzando la Teoria dei Grafi. Le reti della metropolitana di Londra e Parigi sono note in tutto il mondo per la loro vasta estensione e complessità e proprio per queste caratteristiche offrono un ottimo punto di partenza per il paragone con i formicai tenendo conto delle numerosissime ramificazioni e intersezioni.

In conclusione, la sinergia di soluzioni biomimetiche nell'ingegneria civile e nel settore delle strutture permette di costruire, tramite operazioni di progettazione, messa in opera, sviluppo, manutenzione e gestione, opere sostenibili e con un elevato livello di efficienza. L'applicazione dei principi biomimetici consente perciò di far fronte ai problemi ingegneristici permettendo di inaugurare un nuovo metodo di progettazione apportando delle notevoli innovazioni nel settore dell'ingegneria civile.

## 2 Principi di biomimetica

---

Il presente capitolo si concentra sull'approfondimento dei principi fondamentali della biomimetica e sulla loro applicazione nell'ingegneria civile, con particolare riferimento alla costruzione di tunnel.

### 2.1 Applicazioni della biomimetica all'ingegneria civile

La biomimetica è l'ingegneria ispirata alla natura e rappresenta un campo interdisciplinare che si basa sull'osservazione e sull'apprendimento dai processi, dalle strutture e dalle strategie di sopravvivenza presenti in natura per risolvere problemi tecnici complessi.

La parola biomimetica deriva dalle parole greche "bios" e "mimesis" che significano rispettivamente vita e imitazione. Tramite questo approccio non ci si limita a copiare semplicemente l'aspetto esteriore degli organismi viventi, ma si tenta di capire i principi fondamentali che guidano il loro funzionamento e di applicarli in modo creativo e ingegnoso per risolvere le problematiche ingegneristiche.

Gli sviluppi della biomimesi hanno ricordato il ruolo della natura come fonte di ispirazione primaria per poter risolvere i problemi tecnologici e progettuali dell'uomo. La biomimetica si fonda sulla consapevolezza che la natura, nel corso di milioni di anni di evoluzione, ha affrontato e risolto molti dei problemi che l'umanità si trova ad affrontare da circa qualche migliaio di anni. La natura ricopre il ruolo di modello, misura e mentore nella ricerca di strategie sostenibili e all'avanguardia. Modello perché è possibile imitare dalla natura dei modelli che ispirino soluzioni tecniche efficienti. Misura perché è possibile identificare nella natura degli standard ecologici come riferimenti qualitativi e quantitativi. Mentore perché la natura è la maestra che ci segue nella ricerca della soluzione più efficiente.

Ingegneri, progettisti, architetti possono utilizzare la biomimetica come strumento per elevare la sostenibilità delle opere strutturali. Attraverso l'utilizzo di uno schema a forma di spirale definito 'biomimicry design spiral' (spirale di progettazione biomimetica) queste figure professionali sono guidate ad usare l'approccio biomimetico nella fase di sviluppo del progetto.

L'utilizzo della geometria della spirale, oltre a fare riferimento a una forma biologica di un guscio di lumaca, sottolinea la natura iterativa del processo naturale.



Fig. 2.1 Spirale di progettazione biomimetica

Nella spirale di progettazione biomimetica si distinguono sei fasi di cui le prime due, identificazione e definizione sono considerate fondamentali per ottenere risposte complete e significative.

1. Identify (identificazione): fase di identificazione della funzione chiave che deve soddisfare la progettazione.
2. Define (definizione): fase di definizione dei parametri che verranno presi in considerazione.
3. Discover (scoperta): fase di definizione di una caratteristica dell'organismo scelto.
4. Abstract (astrazione): fase in cui si evidenziano in modo astratto le caratteristiche dell'organismo stabilito.
5. Emulate (emulazione): fase di progettazione in cui si uniscono tutte le informazioni ottenute.
6. Evaluate (valutazione): fase di stima per capire se il progetto rispetta le caratteristiche dei principi biomimetici stabiliti.

Lo studio dei materiali biologici risulta uno dei campi promettenti all'interno della biomimesi; questo si basa sullo studio delle proprietà e di ossa,

legamenti, pelle, foglie, squame e scaglie. Si evidenziano alcune delle proprietà principali di alcuni materiali presenti in natura: l'osso è costituito da materiale resistente e leggero; i legamenti sono flessibili e resistono alle sollecitazioni; la pelle è in grado di autorigenerarsi; le foglie, le squame e le scaglie sono in grado di effettuare una autoregolazione termica. L'obiettivo è quello di poter replicare questi elementi distintivi dei materiali naturali per trasferirli a quelli artificiali da impiegare nella costruzione di strutture e nella produzione industriale.

La biomimetica influenza la progettazione nelle forme e nelle geometrie a partire dalle soluzioni adottate da piante, animali e microorganismi per sopravvivere e prosperare nei vari ambienti al variare delle condizioni geologiche e atmosferiche.

Lo studio svizzero 'Herzog & de Meuron' ha progettato uno stadio che richiama la forma dei rami intrecciati di un nido d'uccello insieme al governo cinese.



**Fig. 2.2** Stadio Nazionale di Pechino



**Fig. 2.3** Dettaglio Stadio Nazionale di Pechino

Il consorzio costituito da PTW Architects ha ideato la struttura del National Aquatic Center le cui pareti esterne sono ideate dal modello naturale delle bolle della schiuma di sapone.



**Fig. 2.4** Beijing National Aquatics Centre

Altri esempi concreti dell'influenza della biomimesi possono essere notati negli aerei e nelle turbine che sono state ispirate dalle ali degli uccelli, nei pannelli fotovoltaici che presentano una struttura riconducibile a quella delle foglie. A partire dallo studio degli alberi si possono ideare materiali resistenti, strutture snelle che si sviluppano in altezza, sistemi di ottimizzazione di acqua piovana grazie alla proprietà di assorbimento e filtrazione delle foglie, meccanismi di filtraggio dell'aria. Valutando le strategie di conservazione dell'energia negli animali è possibile ricavare idee per lo sviluppo di sistemi

di illuminazione e ventilazione che abbiano come obiettivo quello di ridurre il consumo energetico. Tramite questo tipo di analisi si è pensato di realizzare una struttura con finalità di raccolta di acqua dalla nebbia che si ispira al modo in cui i coleotteri si dissetano tramite il vapore presente nell'aria.

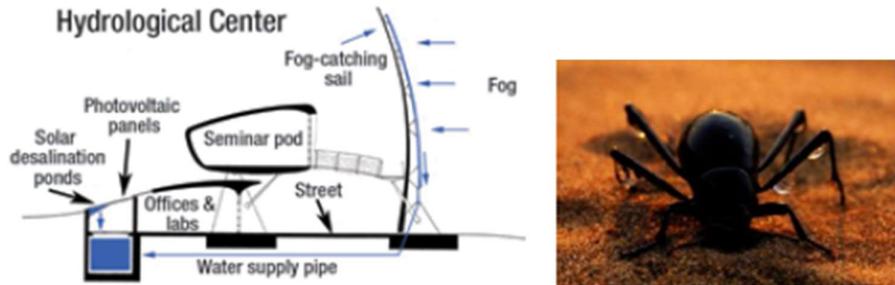


Fig. 2.5 Struttura per la raccolta della nebbia ispirata a un coleottero

Anche la forma degli alveari delle api costituisce un ottimo spunto per applicazioni innovative nel campo dell'efficienza energetica per la realizzazione di pannelli isolanti (pannello a sandwich) o mattoni forati e nel campo della progettazione di materiali airless.

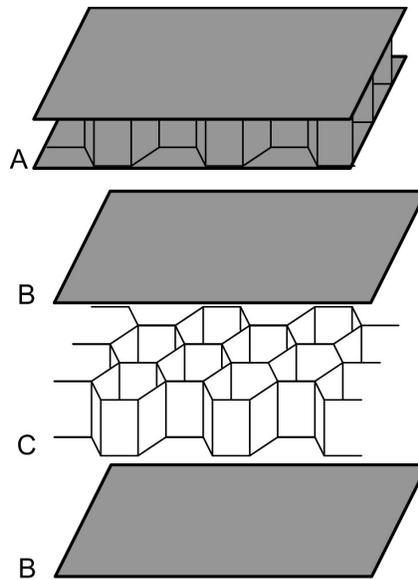
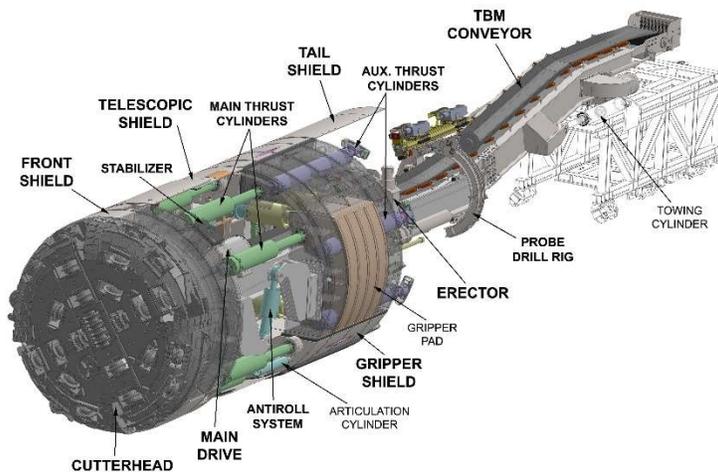


Fig. 2.6 Pannello di isolamento sandwich



**Fig. 2.7** Mattone forato

Un altro settore in cui la biomimetica ha trovato applicazione è l'ottimizzazione dei processi di scavo. Le strategie di scavo impiegate dagli animali scavatori, come i tassi o i talpidi, hanno fornito spunti per sviluppare macchine e metodi di scavo più efficienti, riducendo i tempi di costruzione e i costi operativi. Le TBM (Tunnel Boring Machines) sono i macchinari utilizzati per lo scavo di tunnel di diverse dimensioni in modo efficiente che emulano il metodo di scavo delle talpe. Sono costituite da una parte anteriore che taglia e macina il terreno come gli artigli dell'animale, un corpo che sostiene le pareti del tunnel e una coda che rimuove il terreno scavato.



**Fig. 2.8** Disegno esplicativo TBM

Nell'analisi della realizzazione di strutture sotterranee, oltre ai tassi e alle talpe, è possibile considerare anche le formiche. Le formiche costruiscono, tramite l'asportazione di materiale dal terreno, camere e tunnel sotterranei con percorsi ingarbugliati e intrecciati. I formicai risultano essere strutture complesse e resistenti ai carichi agenti sulla superficie e che vengono costruiti in presenza sia di terreno umido che di terreno asciutto. Fissando come punto di partenza l'espansione nel sottosuolo dei formicai è possibile ideare dei sistemi di ottimizzazione per le gallerie sotterranee, per la metropolitana e per le condutture di sistemi fognari, di acqua potabile e gas. L'utilizzo di algoritmi ispirati alla strategia di comunicazione delle formiche permette di gestire il flusso delle informazioni nei sensori di monitoraggio e di controllo delle strutture sotterranee. I sensori hanno il compito di valutare istante per istante la variazione di temperatura, umidità e la presenza di fumo e sostanze nocive. I rilevatori devono essere posizionati in maniera strategica per garantire la sicurezza e il controllo in maniera rapida in caso di emergenze o eventi critici. Inoltre, i formicai offrono spunti anche per il miglioramento delle prestazioni energetiche: l'analisi dei sistemi di ventilazione presenti nei nidi di formiche può essere applicata per migliorare l'efficienza del flusso d'aria all'interno dei tunnel, garantendo una corretta aerazione e riducendo i costi energetici associati alla ventilazione. La disposizione delle celle può far pensare a sistemi di aerazione che vedano una riduzione della ventilazione meccanizzata e forzata e questo garantirebbe un controllo maggiore anche della temperatura. Il meccanismo di ventilazione bio-ispirato riduce il consumo energetico nella fase sia di raffreddamento che di riscaldamento delle strutture interrate e garantisce il ricircolo di aria fresca grazie alla variazione di temperatura e pressione. La biomimetica ispirata ai formicai offre soluzioni innovative anche nell'ambito della gestione dell'acqua nei tunnel riducendo il rischio di allagamenti e migliorando la sostenibilità idrica. I nidi delle formiche sono strutture in grado di smaltire e allo stesso tempo raccogliere l'acqua piovana nelle camere. Basandosi su questo meccanismo è possibile pensare a delle cisterne da integrare nelle strutture sotterranee che raccolgano l'acqua piovana che può essere utilizzata in caso di incendi o per la pulizia degli ambienti, dei servizi igienici e delle attrezzature. L'utilizzo dell'acqua piovana nei sotterranei deve essere valutato basandosi su quelle

che sono le leggi locali che regolano il riutilizzo dell'acqua ai fini di garantire la sicurezza; solitamente è necessario integrare al sistema di raccolta e stoccaggio delle apparecchiature che si occupino del filtraggio.

## **2.2 Vantaggi dell'applicazione dei principi dei formicai nella costruzione di tunnel**

L'applicazione dei principi biomimetici dei formicai nella costruzione di tunnel offre molteplici vantaggi che permettono di migliorare l'efficienza, la sostenibilità e la durabilità delle infrastrutture sotterranee. L'utilizzo della biomimesi nella progettazione dei tunnel conduce a strutture sotterranee più sicure, efficienti e resilienti, contribuendo allo sviluppo di soluzioni ingegneristiche all'avanguardia in grado di soddisfare le esigenze della società moderna.

Di seguito sono elencati alcuni dei principali vantaggi dell'applicazione dei principi biomimetici nella costruzione di tunnel.

### *1. Efficienza strutturale*

Prendendo spunto dalle strutture sotterranee realizzate da formiche e talpe si possono progettare tunnel in maniera più funzionale in modo tale da garantire la resistenza e la durabilità nel tempo delle strutture. A partire dalla disposizione delle camere, delle gallerie e dei corridoi dei formicai è possibile ottimizzare la distribuzione dei carichi per garantire una migliore stabilità strutturale evitando la concentrazione di stress nelle zone critiche. Lo studio dei formicai permette di determinare la forma dei tunnel che meglio si adatta a resistere ai carichi esterni limitando i cedimenti e aumentando la durata dei tunnel.

### *2. Aumento della stabilità del terreno*

Analizzando la capacità delle formiche di scavare adattandosi al terreno in modo tale da garantire la stabilità dei corridoi, si può migliorare la stabilità del terreno circostante i tunnel, riducendo il rischio di cedimenti e crolli. Le formiche utilizzano movimenti specifici per spostare il terreno tali da ridurre i cedimenti anche in condizioni geologiche complesse.

### *3. Ottimizzazione delle prestazioni*

È possibile migliorare il flusso sotterraneo all'interno dei tunnel e delle gallerie evitando punti di congestione tramite un'analisi di coordinamento e di comunicazione delle formiche. La valutazione delle strategie di illuminazione dei formicai permette di progettare sistemi di illuminazione mirati che riducano i consumi energetici. Lo studio della ventilazione nei formicai conduce all'ideazione di soluzioni che vadano a eliminare la presenza di gas tossici e inquinanti garantendo la qualità dell'aria. Tramite l'approfondimento delle strategie di isolamento acustico utilizzate dalle formiche per comunicare senza disturbare gli altri individui si possono realizzare sistemi di isolamento acustico che riducano la propagazione del rumore nei tunnel.

### *4. Miglioramento della sicurezza*

Le formiche sono organismi in grado di rilevare rapidamente le anomalie nel loro ambiente. Tramite questi meccanismi di rilevamento si potrebbero progettare sensori di monitoraggio e anche ipotizzare la posizione e il numero per rilevare la presenza di fumi tossici, gas, cedimenti. Questi sensori andrebbero inseriti in una rete di monitoraggio continua che consenta di identificare rapidamente le criticità in modo tale da attivare in poco tempo le misure di sicurezza appropriate.

### *5. Riduzione dell'impatto ambientale*

Le formiche sono capaci di costruire strutture complesse minimizzando l'uso di risorse esterne: utilizzano il materiale scavato per costruire il formicaio riducendo i trasporti. L'ottimizzazione dei processi di costruzione tramite i principi biomimetici e il ricorso a materiali sostenibili possono ridurre l'estrazione di risorse naturali andando a limitare l'emissione di gas serra e preservando gli ecosistemi locali. È possibile riutilizzare il terreno scavato come materiale di riempimento o per la produzione di materiali da costruzione.

I principi biomimetici fanno sì non solo che si possano superare le limitazioni dei metodi tradizionali, ma forniscono anche punti di vista innovativi per la

costruzione di tunnel che risultino ecologici, economicamente vantaggiosi e che contribuiscano alla conservazione e al rispetto dell'ambiente circostante.

### **3 Analisi dei formicai**

---

#### **3.1 Studio delle caratteristiche strutturali dei formicai**

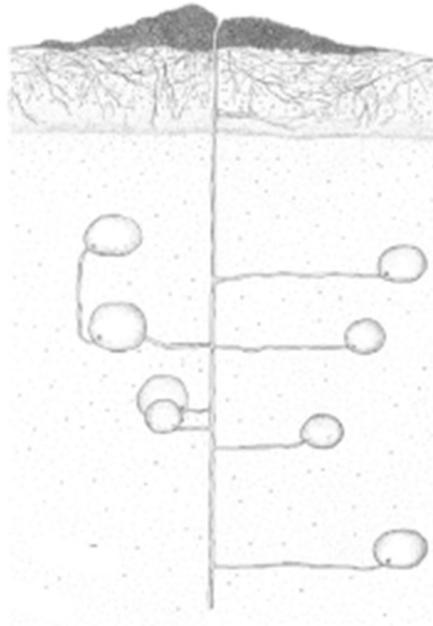
I formicai sono strutture complesse e costruite dalle formiche per ospitare le loro colonie. Le colonie nidificano nel sottosuolo e realizzando strutture che si estendono per diversi metri di profondità e che possono persistere anche per decenni.

Le formiche scavano, trasportano e depositano il materiale con un'organizzazione e un coordinamento eccezionale e questo permette loro di generare delle opere di ingegneria naturale che presentano una notevole varietà di forme e dimensioni. Nonostante i formicai mostrino forme e dimensioni diverse condividono l'obiettivo di garantire un ambiente sicuro ed efficiente per la colonia.

A differenza delle strutture realizzate dall'uomo che sono costituite da unità caratteristiche che vengono assemblate in sequenza, le strutture degli insetti sono realizzate tramite l'assemblaggio con processi auto-organizzati senza quasi nessuna supervisione, perciò, sono meno standardizzate ma in grado di resistere ai cambiamenti delle condizioni al contorno.

I nidi delle formiche si estendono nel sottosuolo seguendo due assi principali: quello verticale e quello orizzontale. I tunnel collegano le camere in cui vengono svolte le varie attività e garantiscono il movimento delle formiche in maniera efficace. Le camere sono utilizzate per svolgere diverse attività come la deposizione delle uova, la conservazione del cibo, la coltivazione di funghi, il deposito di rifiuti e la protezione della regina. I tunnel possono presentare dimensioni variabili a seconda dello scopo per il quale vengono scavati: quelli più grandi garantiscono il regolare passaggio, quelli più stretti vengono utilizzati come via di fuga o come gallerie di difesa in caso di minacce esterne per ridurre i tempi di esposizione ai pericoli. La forma e la disposizione degli elementi interni variano a seconda della specie delle formiche e dalla presenza o meno all'interno del nido della regina. Esistono formicai con struttura simmetrica e con una organizzazione delle camere ben precisa e altri con una disposizione strutturale casuale. Esternamente al nido è presente una parte visibile costituita da una montagnetta di terra smossa

caratterizzata da diversi pori equidistanti che si aprono verso i corridoi all'interno del nido.



**Fig. 3.1** Rappresentazione di un formicaio

Lo studio dei formicai per determinare le caratteristiche geometriche e l'espansione nello spazio, inizialmente, veniva condotto eseguendo degli scavi che procedevano via via verso il basso in prossimità dei nidi. L'orientamento e la profondità venivano documentati e successivamente la forma veniva tracciata su dei fogli di acetato. Questo metodo permetteva una descrizione 2D e di comprendere l'estensione orizzontale del nido ma non permetteva di descrivere l'espansione dei tunnel verticali.

Per fronteggiare questo problema ci si avvale di un nuovo metodo, proposto nel 1988, che prevede di riempire i nidi delle formiche con del gesso odontoiatrico liquido. Questa metodologia fornisce una riproduzione in 3D del nido. È necessario introdurre più volte il gesso in modo tale da farlo fluire in maniera moderata nei corridoi più stretti; a seguito dell'indurimento del gesso, si rimuove il terreno circostante, facendo attenzione ai fragili tunnel stretti che si potrebbero rompere, e si misura la lunghezza, la larghezza, l'altezza e la profondità dei vari elementi. Successivamente si spostano le strutture in laboratorio dove, una volta riassemblate, ne viene studiata in

maniera più approfondita l'espansione. Valutati l'ampliamento del formicaio e la struttura, è possibile conoscere il numero di formiche che costituiscono la colonia facendo disciogliere il gesso in acqua e setacciando il materiale fine. L'utilizzo del gesso consente di riempire e studiare i formicai che si trovano in terreni prevalentemente sabbiosi, ma in presenza di argilla l'aria non defluisce e quindi rende il getto incompleto. Per questo motivo il gesso, seppur economico, è stato sostituito da alluminio fuso, paraffina fusa o zinco. La paraffina è una sostanza che, quando si indurisce, crea delle strutture molto fragili e assorbe l'acqua dell'ambiente circostante. L'alluminio è molto resistente e leggero ma a seguito del suo utilizzo non è possibile contare le formiche. Lo zinco è il materiale da iniettare ideale in presenza di tunnel molto stretti.



**Fig. 3.2** Dettaglio architettura interna del formicaio dopo lo scavo del terreno circostante

Attualmente è possibile effettuare uno studio in tempo reale in maniera non distruttiva dei formicai e di come si espandono tramite l'utilizzo dei raggi X 3D. Questo tipo di studio valuta la rimozione dei grani da parte delle formiche nelle varie scansioni e permette quindi di studiare l'evoluzione della struttura sotterranea.

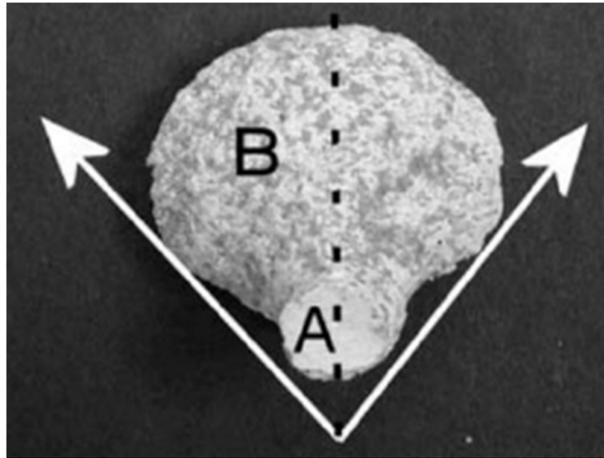
### **3.1.1 Geometria, disposizione delle camere e dei tunnel**

I nidi possono svilupparsi in maniera semplice a livello superficiale o in maniera elaborata nel sottosuolo; quelli sotterranei sono più difficili da studiare e la loro struttura interna è variabile. L'architettura del nido è influenzata dal clima locale, dalla presenza di falde freatiche, dal suolo e dall'età della colonia.

Il foro di ingresso spesso è contornato da una torre di paglia che ha il compito di proteggere l'ingresso del nido da eventi climatici che risultano sfavorevoli alla sopravvivenza degli insetti regolando, probabilmente, l'umidità e la temperatura del nido.

Analizzando le strutture dei formicai scavate, a seguito del processo di colatura di materiale nei fori superficiali dei formicai, si sono evidenziate la forma e la disposizione dei vari elementi nel sottosuolo. Nel corso del tempo sono state condotte diverse sperimentazioni analizzando formicai di varie specie di formiche come le *Atta bisphaerica*, *Acromyrmex landolti*, *A. sexdens* e *A. cephalotes*, *A. laevigata*. Ciascuna specie sviluppa il proprio formicaio in terreni diversi e con modalità di espansione e di posizionamento dei vari elementi interni in maniera differente. Per esempio, le specie *A. sexdens* e *A. cephalotes* nidificano in condizioni di ombra e la deposizione nel suolo è irregolare con cumoli di terreno a forma di piccoli vulcani posti attorno alle buche sopra il cumulo di terreno sciolto; per le *A. laevigata* la deposizione è regolare sia in zone soleggiate e sia in zone ombrate. Alcune specie realizzano il nido con il nucleo apparente non coincide con quello reale e al di sotto è possibile trovare camere in cui si depositano i rifiuti.

Nelle parti superiori del nido le camere, che sono costruite con particelle di terreno provenienti dallo scavo, tutte le camere presentano struttura spugnosa, nella parte sotterranea è presente un reticolo di gallerie e camere. Le camere presentano una struttura semplice o sferica o ellissoidale con fondo generalmente piatto. In ciascuna di queste vengono svolte diverse attività: le camere in cui è presente vita presentano forma ovale e fondo piatto, quelle destinate ai rifiuti hanno forma conica. Il numero delle camere può variare da una o poche a svariate migliaia. I diametri delle colonie, a seconda della specie, sono compresi tra i 15 e i 40 cm, le altezze oscillano tra i 15 e i 30 cm e la profondità tra 0.10 e 7 m. In prossimità del foro di ingresso solitamente sono presenti camere destinate alla coltura di funghi.



**Fig. 3.3** Vista dall'alto di un calco di gesso di un tunnel (A) e della camera (B)

I formicai prevalentemente si sviluppano lateralmente e si verifica un accrescimento del numero delle camere dato da un aumento della colonia nel tempo: il confronto di nidi con età diverse non fa emergere variazioni di profondità ma solo variazioni di espansione laterale. Probabilmente la costanza della profondità è dovuta a temperature e umidità stabili nel sottosuolo.

Il collegamento tra le camere è operato tramite tunnel con percorsi a volte tortuosi e con pareti solitamente lisce. Le dimensioni dei tunnel variano con l'età del formicaio: da alcuni studi è emerso che per formicai di 14 mesi la larghezza è compresa tra 1.5 e 1.9 cm e altezza tra 1.4 e 1.6 cm; per formicai di 28 mesi la larghezza oscilla nell'intervallo tra 2 e 3.4 cm e altezza tra 1.8 e 2.6 cm. La differenza di larghezza dei corridoi è dovuta al maggiore afflusso di formiche operaie dovuto alla crescita della colonia. L'orientamento del tunnel influenza i successivi scavi e in particolare lo scavo delle camere.

Ramificazioni e intersezioni dei tunnel sono presenti nei formicai quando le condizioni del suolo e il contenuto d'acqua consentono stabilità. Le intersezioni si sviluppano quando una galleria in avanzamento ne incontra una preesistente; i rami, invece, derivano da prese laterali dalle pareti dei tunnel. Le prime sono più comuni nelle sabbie, i secondi sono visibili sia in sabbie che nell'argilla.

### **3.1.2 Materiali**

I materiali utilizzati per la realizzazione del formicaio sono scelti con cura dalle formiche per garantire la stabilità e la protezione delle strutture. Le formiche mescolano la saliva o le feci con il terreno scavato. Oltre al terreno, per garantire la stabilità della struttura, le formiche possono utilizzare altri materiali come frammenti di vegetazione che vengono masticati e modellati per la realizzazione delle pareti. Per sigillare le aperture o le crepe del formicaio gli insetti utilizzano le resine o le gomme che sono prodotte da alberi e piante. L'insieme di questi materiali migliora l'isolamento termico permettendo la protezione dalle variazioni di temperatura e regolando l'umidità.

### **3.1.3 Ventilazione**

La temperatura all'interno dei formicai, nonostante l'escursione termica esterna, è quasi costante grazie al sistema di ventilazione e questo garantisce la sopravvivenza della colonia.

La ventilazione all'interno del nido svolge un ruolo cruciale poiché agevola gli scambi di calore con l'ambiente esterno e, allo stesso tempo, contribuisce a prevenire possibili effetti negativi dovuti al raffreddamento del nido. Quando le condizioni climatiche diventano avverse, le formiche adottano una strategia di adattamento modificando l'architettura interna del loro nido spostando frammenti di foglie, ramoscelli secchi o persino piccoli pallini di sabbia, al fine di ottimizzare l'isolamento termico e garantire un ambiente più confortevole e stabile. Questo evidenzia la capacità delle formiche lavoratrici di percepire le variazioni di temperatura, CO<sub>2</sub> e umidità dell'aria e utilizzarle come spunti per la modifica e la costruzione del formicaio. I residui erbosi vengono posizionati per ostruire i fori esterni del nido e i tunnel in presenza di aria secca che costituisce la condizione climatica che innesca la risposta costruttiva. Tuttavia, negli ambienti particolarmente secchi, la realizzazione di codesti tappi può portare a una scarsa ventilazione con una notevole concentrazione di CO<sub>2</sub>; per eludere questo problema gli scambi di aria devono essere consentiti affinché si raggiunga almeno il contenuto minimo di umidità interna.

### **3.2 Processo costruttivo dei formicai**

Le formiche sono maestri di ingegneria: la costruzione e lo scavo del formicaio è un processo sofisticato e che necessita di un coordinamento eccezionale. Adattando strategie complesse e il lavoro collaborativo delle diverse caste all'interno della colonia, i piccoli insetti costruiscono strutture funzionali e resistenti. La configurazione del tunnel che si forma si manifesta come una struttura meccanicamente vantaggiosa ed energeticamente efficiente, basata sulle informazioni locali raccolte dalle formiche lungo il tunnel e sulla sua parte anteriore.

Le formiche operaie possono lavorare in autonomia o anche in modo collaborativo con le altre passandosi il terreno. La realizzazione dei formicai è un processo incredibilmente sofisticato che coinvolge movimenti coordinati, l'utilizzo di mandibole potenti, produzione di saliva e l'adattamento alle diverse condizioni ambientali.

Il processo di costruzione di un formicaio inizia con la ricerca e la scelta del sito. La scelta viene effettuata dopo un'attenta valutazione della disponibilità di risorse, del tipo di terreno, della presenza di acqua e del livello di umidità, della temperatura e della possibile presenza di predatori o agenti antagonisti alla crescita del nido. Le formiche considerano anche la disponibilità di fonti alimentari nelle vicinanze come piante con frutti e fiori da cui possono raccogliere nettare e polline.

La fase di scavo è avviata in risposta a stimoli, infatti, anche una piccola variazione nell'azione di una formica comporta una variazione nel comportamento delle altre.

Gli insetti utilizzano diverse parti del corpo per spostare il materiale: sfruttano le mandibole, le zampe anteriori con gli artigli affilati e talvolta anche il corpo. La selezione degli elementi da trasportare è effettuata in modo tale che le dimensioni non superino quelle della mandibola dell'insetto: sia  $M$  la dimensione della mandibola,  $d$  la dimensione della particella del terreno,  $p$  la dimensione del pellet e  $D$  il diametro del tunnel.

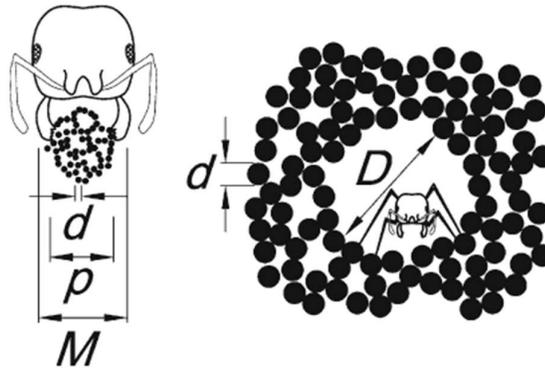
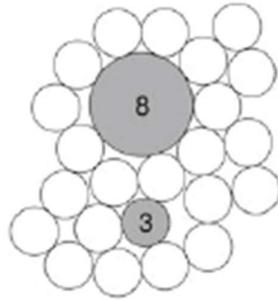


Fig. 3.4 Caratteristiche geometriche

In presenza di terreni argillosi o limosi, le formiche adottano strategie specifiche per rimuovere il terreno. Se il contenuto di acqua è molto basso formano agglomerati di particelle; man mano che l'acqua aumenta, le formiche iniziano a formare grumi di particelle più grandi e stabili che possono raggiungere i 3 mm circa. Le formiche possono afferrare con successo diverse particelle di sabbia secca contemporaneamente, ma il trasporto di terreni asciutti grossolani è limitato dal numero massimo di particelle che possono essere afferrate e trattenute dall'attrito. Tuttavia, quando è presente l'acqua, le formiche formano grumi di sabbia più stabili. Per gestire il trasporto sia di sedimenti sabbiosi che argillosi, le formiche utilizzano la loro barba.

Il fattore che limita la rimozione delle particelle nelle ghiaie grossolane è la dimensione mandibola/particella ( $M/d$ ) quando questo rapporto si avvicina al valore dell'unità (1). La tendenza delle formiche è quella di afferrare singolarmente le particelle più piccole se queste hanno  $d < M$ , anche se, dal punto di vista energetico, sarebbe conveniente trasportare una particella più grande. Si considera, per spiegare ciò, il numero medio di contatti per particella o il numero di coordinazione (CN). Il numero di coordinazione di una particella di confine in un pacchetto di particelle disposte in modo monodimensionale varia da 3 a 5, il che significa che una particella in una configurazione unidimensionale ha mediamente da 3 a 5 contatti con altre particelle adiacenti. In un imballaggio di particelle di dimensioni bimodali, le particelle più piccole presentano CN proporzionale a  $\pi/2 (d_{\text{large}}/d_{\text{small}})^2$ , basato

sul rapporto tra l'area superficiale della particella più grande e l'area di quella più piccola.



**Fig. 3.5** Meccanismi geo-meccanici: numero di coordinazione

La velocità di avanzamento nei terreni secchi è limitata dalla capacità delle formiche di mantenere insieme più di una particella per attrito. L'efficienza dello scavo migliora man mano che il rapporto tra la dimensione delle mandibole delle formiche e la dimensione delle particelle di terreno  $M/d$  diminuisce nei suoli grossolani. Le strategie adoperate per la rimozione delle particelle variano in base al rapporto tra la dimensione della mandibola e la dimensione del granello  $M/d$  e alle forze capillari in termini di saturazione dell'acqua  $S\%$  o di suzione. Di seguito, in Fig. 3.5, viene riportata l'analisi delle strategie di rimozione al variare delle condizioni:

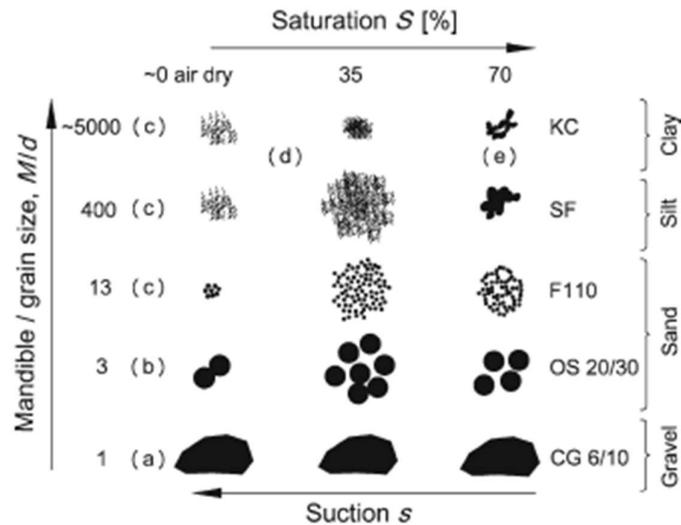
caso a) un singolo granello viene rimosso;

caso b) poche particelle vengono trattenute per attrito, con l'effetto aumentato dalle forze capillari;

caso c) la capillarità è fondamentale per l'efficacia dello scavo e per il trasporto di più particelle;

caso d) conglomerati sciolti formati grazie al rastrellamento delle zampe;

caso e) forze di attrazione elevate limitano l'escavazione a piccoli blocchi, e la formazione dei grumi permette un trasporto efficace.



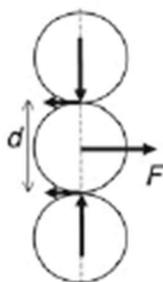
**Fig. 3.6** Analisi strategie di rimozione al variare di  $M/d$  e del contenuto di acqua  $S\%$

Nei terreni umidi a grana fine, i ritmi di scavo ridotti sono il risultato delle sfide incontrate durante lo scavo al fronte del tunnel. La forza richiesta per spostare una particella sferica di terreno con dimensioni simili a quella della mandibola  $M$  delle formiche soggetta a forze di attrazione intercapillare ( $A$ ) può essere stimato come

$$F = \frac{\pi}{4} \left( \frac{M}{d} \right)^2 A \quad (1)$$

Le formiche tendenzialmente scavano seguendo le catene di forza piuttosto che attraversarle poiché questo può condurre a una sorta di instabilità intrinseca. Nei terreni in cui è presente ghiaia e granuli più grossi, gli insetti inizialmente rimuovono le particelle sciolte, evitando accuratamente le particelle portanti che fanno parte delle catene di forza dello scheletro granulare. Per riuscire a rimuovere le particelle portanti è necessaria una elevata forza di trazione. Utilizzando il coefficiente di attrito  $\mu$ , lo sforzo dato dal sovraccarico del suolo  $\gamma$ , la profondità  $z$  è possibile determinare la forza di trazione necessaria per compiere questa azione

$$F = 2 \gamma_{\text{soil}} z d^2 \mu \quad (2)$$



**Fig. 3.7** Forza di trazione richiesta per rimuovere la particella di dimensione  $d$

L'aumento dello sforzo di sovraccarico con la profondità comporta un impedimento nella rimozione delle particelle che supportano il carico e questo fa sì che ci siano minori ramificazioni ad elevate profondità. Nel momento in cui la formica sposta una particella che supporta il carico della catena si ha un crollo parziale fino a quando non si forma un nuovo arco.

### 3.2.1 Stabilità dei formicai

Le forze intercapillari e quelle elettrostatiche svolgono un ruolo significativo nella determinazione della stabilità del fronte, nell'abilità di formare agglomerati di particelle di terreno e nel successivo processo di trasporto. È essenziale condurre una valutazione delle forze coinvolte che includono le forze capillari tra le particelle (C), le forze di attrazione elettrostatica di van der Waals (E), il peso delle particelle (W) e la forza di trazione della mandibola delle formiche (U).

La forza capillare tra due particelle sferiche è influenzata da due principali fattori: l'area della sezione trasversale del menisco d'acqua nei punti di contatto tra le particelle e la suzione dell'acqua, che rappresenta la differenza di pressione tra aria e acqua.

La forza attrattiva elettrostatica di van der Waals dipende dalla costante di Hamaker e dalla separazione interparticellare tra le particelle sferiche.

Il peso specifico di una particella di dimensione  $d$  è influenzato dalla gravità, dal peso specifico, della gravità e della densità dell'acqua.

La forza di trazione generata dalla mandibola delle formiche limita la loro capacità di spostare le particelle: è stato dimostrato che questa forza è circa da 30 a 60 volte il loro peso.

In fig. 3.8 sono rappresentate le forze W, C, E, U al variare del diametro delle particelle e quindi al variare della tipologia di terreno. Il peso proprio delle particelle è maggiore dell'attrazione elettrostatica per particelle di dimensioni comprese tra i 4 e i 40  $\mu\text{m}$  e della forza capillare per particelle con  $d > 4 \text{ mm}$ .

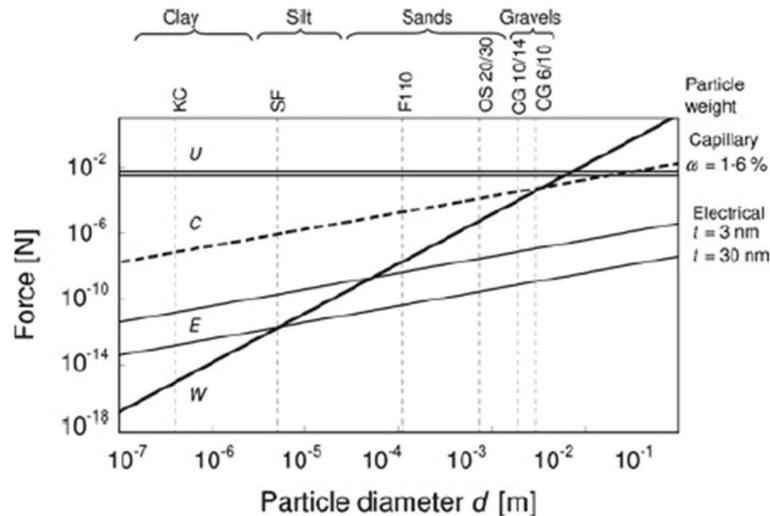


Fig. 3.8 Forze intercapillari al variare del diametro delle particelle di terreno

Si sottolinea l'importanza sia del peso delle particelle e sia delle forze capillari. Le forze capillari garantiscono una distribuzione delle forze isotropa, quindi uniforme, nei terreni limosi e nelle sabbie umide. Va notato che la dimensione massima delle singole particelle e degli agglomerati è vincolata dalla forza delle formiche nel trasportare grani senza cadere in avanti a causa dell'elevato momento ribaltante che si creerebbe sulle zampe anteriori.

### 3.2.2 Tempi di costruzione e costo dello scavo

I tempi di costruzione dei formicai variano in base alle dimensioni, alla complessità della struttura, alla grandezza della colonia e al numero di formiche operaie coinvolte, alle condizioni ambientali. I nidi più semplici possono richiedere poche ore per essere completati, quelli più grandi e ingarbugliati possono richiedere anche intere settimane e mesi di lavoro continuo.

Il tempo impiegato da una singola formica operaia per rimuovere e spostare una particella di terreno varia notevolmente all'aumentare della profondità

poiché l'insetto percorre il doppio della distanza una volta per la salita e una volta per la discesa.

La quantità di lavoro necessaria per lo scavo del nido è valutata tramite un meticoloso studio delle formiche e delle loro capacità di scavo. Si utilizzano fattori come il volume del nido rispetto in relazione alla profondità, il peso medio di una formica operaia e la dimensione del carico trasportato per valutare la spesa energetica che permette di portare a termine l'escavazione del formicaio.

Alcuni esperimenti hanno dimostrato che la quantità di lavoro richiesta per la rimozione di terreno dal nido varia da 130 J a 8.800 J, con una media di 790 J. Tramite un'analisi delle capacità di scavo di una formica media in laboratorio, è stato stimato il numero di viaggi che ogni operaia dovrebbe compiere, insieme al suo carico, per risalire in superficie e scendere, senza carico, in ogni intervallo di 5 cm di profondità del nido. Questi calcoli hanno portato a una stima compresa tra 10.000 e 460.000 ore di lavoro delle formiche per l'escavazione a una temperatura di 28 °C. Se tutte le operaie partecipassero equamente all'escavazione, si stima che ogni formica dovrebbe contribuire con circa  $158 \pm 66$  ore di lavoro per la costruzione completa del nido. La creazione di un nido da zero richiederebbe all'incirca una settimana di lavoro, indipendentemente dalle dimensioni della colonia; tuttavia, è importante notare che nella pratica la durata effettiva potrebbe essere notevolmente più lunga, poiché non tutte le formiche lavorano in maniera simultanea.

Il costo associato all'escavazione del nido per una colonia di formiche è influenzato dalla frequenza con cui la colonia decide di spostarsi nel corso dell'anno; generalmente gli spostamenti si verificano una o due volte l'anno nella maggior parte delle specie di formiche. Se si considera il caso in cui una colonia si sposti due volte all'anno e si tiene conto dell'energia spesa per l'escavazione del nido in rapporto alla spesa energetica totale, che comprende tutti gli altri costi, si può dedurre che circa il 20% dell'energia complessiva è destinato alla costruzione del nido. Si noti che questa stima si basa sempre sull'assunzione piuttosto irrealistica che tutte le operaie partecipino attivamente allo scavo del nido, il che potrebbe non essere il caso nella realtà. La durata effettiva dell'escavazione potrebbe essere considerevolmente più

lunga, poiché l'attività di scavo richiede tempo e sforzo significativi da parte degli insetti operai. Inoltre, il tempo dedicato allo scavo del nido comprende non solo i costi diretti dell'escavazione, ma potrebbe anche comportare costi di opportunità, poiché le operaie potrebbero impegnarsi nell'ottimizzazione e miglioramento del nido invece di dedicarsi all'acquisizione di cibo.

## 4 Applicazione dei principi biomimetici nella costruzione di tunnel

---

Le gallerie sotterranee rappresentano una forma fondamentale di infrastruttura utilizzata in diversi settori, che vanno dall'ingegneria civile e mineraria alla costruzione di tunnel per il trasporto e la distribuzione di servizi essenziali. La realizzazione di gallerie sotterranee richiede una puntuale valutazione e un'approfondita comprensione di una vasta gamma di aspetti tecnici, logistici ed economici. Inoltre, per ottimizzare e migliorare i processi costruttivi è possibile utilizzare un approccio olistico e innovativo come quello della biomimetica. Considerando i formicai come modello biomimetico per la realizzazione dei tunnel, si valuteranno le analogie nelle modalità di scavo, di ventilazione, di stabilità e i costi e tempi di realizzazione.



Fig. 4.1 Galleria sotterranea

### 4.1 Progettazione e pianificazione

La progettazione prevede la realizzazione di diversi progetti:

- *Progetto preliminare*: definisce le caratteristiche qualitative e funzionali delle opere e pertanto la sua redazione è subordinata

all'individuazione dei bisogni collettivi da soddisfare e le relative funzioni che dovrà svolgere l'intervento;

- *Progetto definitivo*: redatto sulla base delle indicazioni del progetto preliminare e consiste in una relazione descrittiva degli elementi di progetto corredata da elaborati grafici, indagini e calcoli preliminari sulle caratteristiche dell'opera, delle strutture e degli impianti, analisi delle quantità e dei costi previsti, nonché di un computo metrico estimativo;
- *Progetto esecutivo*: redatto in conformità al progetto definitivo, determina in maniera dettagliata i lavori da realizzare e il relativo costo previsto e deve essere sviluppato ad un livello di definizione tale da consentire che ogni elemento sia identificabile in forma, tipologia, qualità, dimensione e prezzo.

Nello specifico, la prima fase della progettazione prevede l'analisi del contesto in cui verrà realizzata la galleria e gli obiettivi del progetto. Vengono considerati fattori come la posizione geografica, le condizioni geologiche e geotecniche del terreno, le normative e i requisiti ambientali. È necessario condurre degli studi geologici e geotecnici per definire la tipologia di terreno e la sua stabilità, la presenza di falde sotterranee e il contenuto d'acqua del terreno. Il progetto delle indagini preliminari deve essere sviluppato a partire dalla conoscenza delle condizioni di rischio che dovranno essere affrontate. Per gallerie corte o medie sotto coperture non elevate si utilizzano di mezzi di investigazione classici abbinati ad analisi di rischio; per gallerie ad elevate profondità le perforazioni di sondaggio devono essere di particolare lunghezza e possono essere realizzate in verticale o in maniera inclinata utilizzando tecniche di tipo petrolifero o minerario e permettono la determinazione delle caratteristiche mineralogiche delle rocce.

Si definiscono le necessità e le esigenze specifiche di progetto per stabilire le finalità della galleria, la sua capacità, le dimensioni e la posizione. Il dimensionamento del tunnel è influenzato dalla velocità del treno che lo percorrerà, dalla potenza di trazione, dal numero di treni che

contemporaneamente possono percorrerlo. La fase nella quale si definisce il tracciato prevede l'identificazione del percorso della galleria tenendo conto dei vincoli ambientali, topografici e geologici. A partire dal tipo di terreno e dall'andamento del tracciato si sceglie la metodologia di scavo che più conviene.

Nella fase di progettazione, basandosi sui risultati delle prove che si effettuano per verificare la stabilità del terreno, si definiscono gli elementi di supporto per garantire la sicurezza e la durabilità delle strutture sotterranee. Si scelgono, quindi, i materiali che dovranno resistere a carichi elevati dati dalle sollecitazioni del terreno circostante, alle variazioni di temperatura e all'umidità. Si definisce il sistema di ventilazione per la circolazione dell'aria necessario per garantire il quantitativo minimo di ossigeno che permette agli operatori di lavorare.

La pianificazione della manutenzione è un aspetto di elevata importanza nella progettazione poiché assicura che le strutture si mantengano nel tempo per salvaguardare la sicurezza e l'efficienza. Si realizzano piani di manutenzione programmata e piani per interventi tempestivi per imprevisti o guasti. Il deterioramento è scongiurato tramite ispezioni regolari mirate a valutare rivestimenti, strutture, illuminazione e sistemi di ventilazione e tramite l'utilizzo di sensori che raccolgono i dati e li trasmettono alle stazioni di controllo. Si effettuano delle analisi che riguardano la gestione dell'energia per poter valutare i costi operativi e per attuare delle strategie di risparmio come, per esempio, l'utilizzo di sistemi LED a basso consumo.

In alcuni casi si effettuano anche dei progetti per valutare possibili ampliamenti futuri delle strutture sotterranee. Basandosi sulle esigenze di trasporto e di servizi si cerca di prevedere quali infrastrutture aggiungere per implementare la struttura esistente evitando interruzioni ed elevati costi di ampliamento.

Una volta completata la fase di progettazione, il progetto viene presentato per ottenere le autorizzazioni necessarie per la realizzazione.

## **4.2 Metodologia di scavo**

Nell'ambito dei tunnel e delle gallerie esistono due metodologie di scavo nella roccia: metodi di scavo convenzionali e dei metodi di scavo

meccanizzati. Il primo metodo è effettuato tramite la tecnica Drill & Blast, il secondo, invece, utilizza macchinari sotterranei denominati Tunnel Boring Machines (TBM) o talpe, Microtunnelling e Horizontal Directional Drilling. Attualmente il metodo più utilizzato è quello che prevede la realizzazione del tunnel mediante TBM.

L'approccio drill & blast può essere utilizzato con tutte le tipologie di rocce a differenza del metodo meccanico con TBM e i costi iniziali risultano essere inferiori e valutando la produzione giornaliera si evincono tempi di avanzamento inferiori a uno scavo eseguito con il macchinario TBM. La scelta del metodo viene effettuata tenendo conto della lunghezza dello scavo: per tunnel con lunghezza inferiore ai 2 km non è conveniente utilizzare la TBM.

#### **4.2.1 Metodo Dill & Blast**

Inizialmente tramite una macchina perforatrice si effettuano i fori sul fronte di scavo nei quali viene inserito il materiale brillantante; il numero dei fori è determinato dalla tipologia di roccia: più la roccia è dura e maggiore sarà il quantitativo di fori da realizzare. La macchina perforatrice può realizzare fori con lunghezza variabile dai 2 ai 6 metri e con diverse inclinazioni.



**Fig. 4.2** Macchina perforatrice

I fori, dopo essere stati riempiti da esplosivo, vengono collegati a dei detentori.



**Fig. 4.3** Posizionamento esplosivi nei fori

I fori vengono fatti saltare seguendo un preciso ordine dal centro verso l'esterno solo quando ci si è accertati che nell'area di scavo non sia presente nessun operatore. Il processo di esplosione termina in pochi secondi.



**Fig. 4.4** Esplosione per scavo

L'esplosione provoca la frantumazione della roccia ma anche un quantitativo di gas e polveri elevato che devono essere eliminati per poter procedere con le operazioni. A questo scopo sono inseriti dei sistemi di ventilazione solitamente a due vie che introducono aria pulita dall'esterno e aspirano aria inquinata; solitamente i tubi di ventilazione sono o in plastica o in acciaio. Le macerie vengono poi rimosse con mezzi su ruote o tramite un sistema di carrelli su rotaie e trasportate esternamente in discariche o nel sito di raccolta.

A seguito delle operazioni di smarino si procede con la stabilizzazione il tunnel tramite un rivestimento temporaneo di calcestruzzo a rapida presa che viene spruzzato. Possono essere utilizzate reti metalliche, bulloni, chiodi centine per la messa in sicurezza. Accertata la stabilità del fronte si eseguono studi sulla roccia che permetteranno di definire le caratteristiche meccaniche della roccia, la presenza di piani di scorrimento e la composizione mineralogica. Tramite quest'ultima analisi si verifica la presenza di amianto nel sottosuolo in modo tale da poter adottare le tecniche necessarie per la protezione individuale e collettiva. Si procede quindi con la stabilizzazione anche del fronte.

Il ciclo di scavo tramite questa tecnica può essere riassunto nella seguente figura (Fig. 4.5)

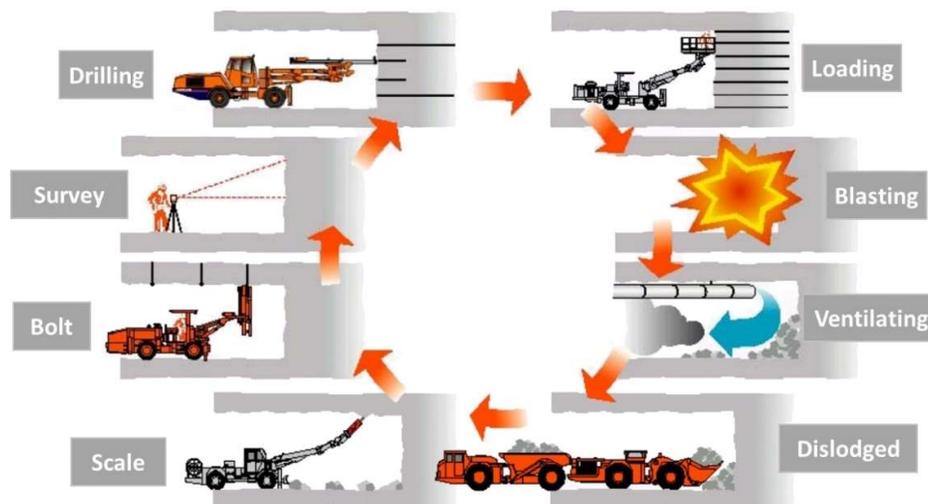


Fig. 4.5 Ciclo di scavo metodo Drill & Blast

#### 4.2.2 Metodi meccanizzati

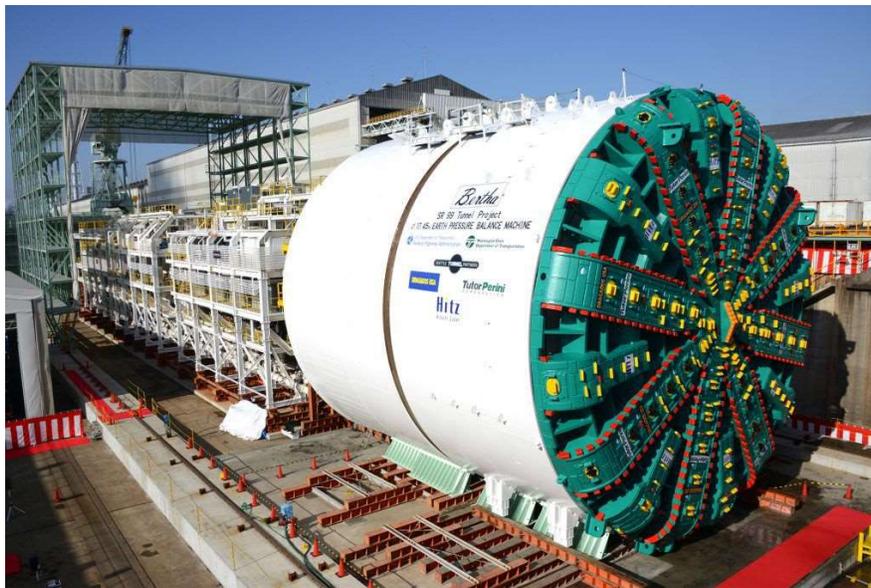
Lo scavo meccanizzato può essere effettuato con mezzi meccanici tradizionali come pale meccaniche, rippers e martelli demolitori. Questi macchinari portano a tempi di scavo dilatati nel tempo ma consentono di realizzare sezioni di qualsiasi forma e dimensione, purché inferiori a 30 m<sup>2</sup>. Le tecniche di scavo meccanizzato avanzato TBM, Microtunnelling e Horizontal Directional Drilling, trovano largo impiego nella costruzione di gallerie metropolitane, la posa di reti di servizi e sottoservizi. Il progresso e

l'uso di codeste tecnologie è dovuto alla loro versatilità nella realizzazione dello scavo in differenti condizioni geo-litologiche.

Il macchinario TBM (Tunnel Boring Machine) è utilizzato per la realizzazione di gallerie con diametri che superano i 3000 mm, al di sotto di questo valore si parla di Microtunnelling. I due macchinari presentano gli stessi principi di funzionamento, ciò che varia sono le dimensioni del diametro della sezione da scavare, la lunghezza, la grandezza del macchinario. L'Horizontal Directional Drilling viene utilizzata per il posizionamento di tubazioni in acciaio e polietilene.

### *Tunnel Boring Machine*

Le TBM consentono di industrializzare in maniera elevata il processo di realizzazione del tunnel: il terreno viene scavato e subito dopo si posizionano i conci in cemento armato prefabbricato come in una catena di montaggio. Questo macchinario presenta costi elevati perciò si devono conoscere le caratteristiche del terreno per ottimizzare lo scavo. L'impiego della Tunnel Boring Machine presenta vantaggi significativi tra cui la creazione di un cantiere con condizioni di sicurezza migliori, una semplificazione del lavoro per gli operatori e un aumento della velocità di escavazione.



**Fig. 4.6** TBM con dimensioni più grande al mondo ( $\varnothing 17.45\text{m}$ )

Le TBM sono costituite da diverse parti che svolgono ruoli specifici nel processo di scavo. Anteriormente è presente la testa, ossia l'elemento principale, responsabile dell'effettivo scavo del terreno. La testa è costituita da un disco dotato di moto rotatorio che frantuma il terreno man mano che la TBM avanza. La testa è spesso dotata di elementi dentati taglienti che aumentano l'efficacia di scavo: i denti permettono di attaccare e distaccare la roccia compatta e la roccia degradata o i terreni sciolti. Il motore è un elemento essenziale che fornisce l'energia necessaria per lo scavo e per l'avanzamento; si trova nella parte centrale o posteriore della macchina. Nelle TBM più recenti il motore è controllato con sistemi di automazione che regolano velocità e potenza in base alle condizioni del terreno e alle esigenze di scavo. A seguito si sviluppa la gabbia di taglio, responsabile della rimozione del materiale scavato. È presente un nastro trasportatore che raccoglie il terreno e lo sposta verso l'esterno della galleria. Nella parte centrale si trovano i pannelli operativi e di controllo, costituiti da sensori, che vengono utilizzati dagli operatori per monitorare il funzionamento della TBM. Il sistema di sostegno garantisce la stabilità delle pareti del tunnel: si posizionano dei pannelli prefabbricati non appena si scava la sezione. Spesso la TBM è dotata di uno scudo di sostegno che provvede a spingere le pareti per fornire un supporto immediato. Alla macchina segue un traino costituito da una struttura atta a ricevere ed avvicinare i mezzi di sgombero del detrito e ad approvvigionare la zona di lavoro dei materiali necessari e a ricevere attrezzature che consentano di predisporre particolari operazioni riguardo alle opere di sostegno.

Le TBM possono essere suddivise in due principali categorie: per lo scavo di gallerie in formazioni rocciose di resistenza medio alta si utilizzano le Hard Rock Machine e per lo scavo in terreni sciolti le Slurry Shield Machine e Earth Pressure Balance. Il problema che le Hard Rock Machine devono affrontare è costituito dall'abbattimento della roccia. La Slurry Shield Machine e l'Earth Pressure Balance sono solitamente adoperate per lo scavo di gallerie di lunghezza limitata in terreni generalmente omogenei e sciolti e con presenza d'acquifero; il problema di base da affrontare con questo tipo di macchine è quello della stabilità dello scavo e del fronte.

### *Microtunnelling*

Il microtunneling è una tecnica di scavo meccanizzata utilizzata per la realizzazione di gallerie sotterranee di piccole dimensioni con un diametro compreso tra 0,6 e 3,0 metri. Questa tecnica è particolarmente adatta per scavare tunnel in spazi ristretti o in aree urbane densamente popolate, dove l'utilizzo di grandi macchine di scavo come le TBM non sarebbe pratico.

Nel microtunneling, la macchina di scavo (MTM), opera in un ambiente confinato e controllato, garantendo un'alta precisione e minimizzando gli impatti sull'ambiente circostante.



**Fig. 4.7** Microtunnelling MTM

Con il sistema microtunnelling si eseguono condotte sotterranee in terreni di qualsiasi natura e consistenza, anche sottofalda, con sistema a spinta controllata. L'unità di perforazione è dotata di un sistema laser di rilevamento continuo, il quale permette di rilevare istantaneamente eventuali deviazioni dalla traiettoria prevista e di apportare correzioni necessarie. Queste correzioni vengono effettuate attraverso la regolazione della spinta tramite martinetti idraulici esterni all'unità di perforazione, nonché mediante l'utilizzo di martinetti direzionali posizionati internamente all'unità stessa. Per ciò che concerne la struttura e il funzionamento dell'MTM si può affermare che

presenta gli stessi elementi e lo stesso processo di scavo della TBM ma in scala ridotta.

### **4.3 Stabilizzazione del tunnel e materiali**

La stabilizzazione dei tunnel e la scelta dei materiali deve essere effettuata con lo scopo di garantire la sicurezza e la durabilità delle strutture. I materiali e le tecniche di stabilizzazione vengono scelte tenendo conto delle esigenze di progetto come le dimensioni finali del tunnel e le condizioni geologiche. La funzione principale dei sistemi di ancoraggi è quella di fornire un controllo dei fenomeni deformativi e di sostenere gli elementi di roccia ormai disarticolati.

A seguito dello scavo, realizzato con i metodi tradizionali, si effettua il pre-rivestimento che sostiene temporaneamente lo scavo fino al rivestimento definitivo per evitare problemi legati alla caduta e disgregazione dei materiali rocciosi. In questa fase vengono utilizzate le centine, i bulloni, le reti elettrosaldate e spesso si fa ricorso anche a dei getti di calcestruzzo.

Tramite una macchina perforatrice si realizzano dei fori di piccolo diametro nella volta dello scavo seguendo un preciso schema, si puliscono da eventuali detriti rimasti e si inseriscono i bulloni. I bulloni sono costituiti da aste in acciaio filettate per evitare che si possano sfilare con testa piatta o esagonale e diametri che possono variare tra alcuni millimetri e centimetri. Per migliorare la tenuta è possibile utilizzare delle resine che vengono iniettate per garantire una solida connessione.



**Fig. 4.8** Installazione dei bulloni sulla volta del tunnel

Le centine sono elementi metallici, solitamente in acciaio, che possono essere diversi a seconda delle esigenze di progetto e che vengono installati in serie lungo il tunnel per permettere una distribuzione del carico; è possibile inserire delle centine aggiuntive in presenza di punti critici come curve e zone instabili. Possono presentare forma circolare, rettangolare o ad arco a seconda del tipo di tunnel e delle condizioni geologiche. Per poterle posizionare è necessario rimuovere i detriti dal fronte scavo e dalle pareti. Queste strutture metalliche devono essere fissate al terreno con tiranti e bulloni. Dopo averle posizionate, si regolano in larghezza con dei bracci telescopici affinché ci sia una pressione costante sulle pareti del tunnel.

Per garantire stabilità alle pareti e alla volta è possibile effettuare un getto di rivestimento in calcestruzzo che lega tra loro le centine e chiude i vuoti tra due centine consecutive.



**Fig. 4.9** Posizionamento e regolazione delle centine tramite bracci telescopici

In presenza di scavo realizzato tramite gli approcci meccanizzati, TBM E MTM, si inseriscono per garantire la stabilità in tunnel degli elementi in calcestruzzo armato prefabbricati. Gli elementi in calcestruzzo armato si incastrano tra loro fino a formare un anello. Gli anelli possono essere progettati e realizzati con diverse forme e dimensioni per adattarsi al progetto e alle caratteristiche del terreno. Il posizionamento dei conci avviene durante il processo di avanzamento della TBM: gli elementi prefabbricati presentano

forma circolare o semicircolare e si incastrano tra loro formando un cerchio completo o parziale.



**Fig. 4.10** Anello formato da conci in calcestruzzo armato prefabbricato

Il collegamento avviene tramite staffe ed è effettuato da una struttura di supporto chiamata “scudo” che permette di guidare il processo di inserimento. Quando i conci sono tutti inseriti si riempiono gli spazi tra essi con malta e cemento per garantire l’uniformità. Successivamente si procede con delle verifiche di stabilità per controllare che la struttura realizzata fornisca il giusto sostegno.



**Fig. 4.11** Tunnel realizzato con TBM ed elementi prefabbricati

### **4.3.1 Meccanismo di rottura del fronte del tunnel**

L'eventualità di un possibile crollo in galleria è un evento complesso perché è influenzato dalla variabilità aleatoria delle proprietà meccaniche della roccia e dalla presenza di fessure e fratture in essa.

Nell'articolo "Limit Analysis of Collapse Mechanisms in Cavities and Tunnels According to the Hoek–Brown Failure Criterion" di M. Fraldi e F. Guarracino, è stato evidenziato come i diversi sistemi per stimare il grado di sicurezza e i metodi empirici possono essere utilizzati anche se i risultati possono variare e la loro applicabilità è influenzata dal giudizio del progettista. Le analisi agli elementi finiti possono essere utilizzate per valutare il grado di sicurezza anche se potrebbero portare problemi nella modellazione e nella convalida dei risultati. La stima delle proprietà meccaniche del materiale può essere efficace per valutare il grado di sicurezza di un tunnel.

Nel corso degli ultimi decenni sono state proposte diverse tecniche di analisi per stimare la stabilità; queste si focalizzano sull'inizio della plasticità piuttosto che sulla cinematica del collasso e ciò può essere fuorviante poiché nelle analisi elastiche, così come nelle analisi agli elementi finiti, capita spesso che il primo cedimento non sia quello relativo al meccanismo di collasso.

Si esamina di seguito l'approccio classico di Lippmann che considera il criterio di fallimento di Hoek-Brown, al posto della regola di cedimento di Mohr-Coulomb, per ottenere una soluzione della teoria della plasticità con l'ausilio di strumenti classici di calcolo delle variazioni. La difficoltà delle procedure basate sull'approccio di Lippmann consiste nel trovare un limite inferiore utile alle forze di collasso e per questo motivo la procedura variazionale permette di esaminare in maniera diretta il valore minimo delle forze, considerato come il carico di collasso, con un approccio cinematico.

Il vantaggio della procedura risiede nella elevata semplicità dei calcoli richiesti, che possono portare a una significativa visione fisica dei parametri che mantengono il problema in uno stato di equilibrio e offrono anche una prima validazione alle successive analisi. L'uso del criterio di Hoek-Brown è diffuso per ammassi di roccia dura strettamente interconnessi e, a causa della

mancanza di alternative adeguate, è utilizzato anche su ammassi di roccia di qualità molto scadente. A inizio 1980 non erano disponibili metodi consoni per stimare la resistenza degli ammassi rocciosi e tutte le formule e i software per la meccanica del suolo e delle rocce erano stati scritti in termini del criterio di Mohr-Coulomb. Il contributo significativo di Hoek e Brown è stato quello di collegare l'equazione adimensionale, che poteva essere scalata in relazione alle informazioni geologiche, alle effettive caratteristiche dell'ammasso roccioso. Per ottenere parametri geologici di valore pratico, è spesso necessario stimarli attraverso osservazioni dirette sul campo. In questo contesto, si fa l'ipotesi che il cedimento della roccia integri un ruolo significativo nel processo globale di cedimento. Inoltre, si assume che non ci siano direzioni preferenziali di rottura all'interno della roccia e che la roccia stessa possa essere considerata un mezzo isotropo, ovvero con proprietà uniformi in tutte le direzioni.

Considerando il problema piano e facendo riferimento alla sezione trasversale della cavità, M. Fraldi e F. Guarracino hanno cercato nel corso dei loro studi di stimare la forma e le dimensioni dell'ammasso roccioso che può crollare dalla volta del tunnel. In seguito, si farà riferimento a un'apertura nella roccia di forma rettangolare. La soluzione può essere raggiunta mediante il principio del minimo di Greenberg con riferimento a un meccanismo di tipo Coulomb ossia un meccanismo in cui blocchi di materiale si muovono rigidamente l'uno rispetto all'altro. Adottando il criterio di Hoek-Brown, si deduce che i blocchi che crollano non hanno una forma poligonale, e la configurazione effettiva della porzione che crolla diventa un'incognita del problema.

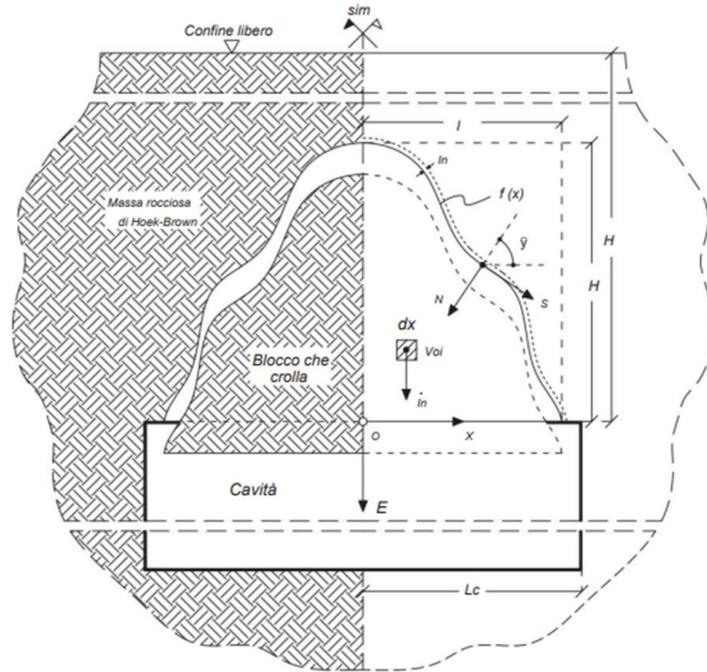


Fig. 4.12 Blocco roccioso in crollo

La forma del blocco è stimata tramite l'equazione di Eulero associata al principio di massima dissipazione plastica. La forma del blocco collassante è calcolata uguagliando il lavoro esterno all'energia dissipata internamente su un campo cinematicamente ammissibile, cioè che soddisfi la condizione al contorno di velocità e di comparabilità tra velocità di deformazione e velocità. Andando a minimizzare rispetto alle incognite del problema si ricava il meccanismo di collasso. Le condizioni al contorno sono:

1. Materiale con comportamento plastico;
2. Superficie di snervamento convessa per ottenere le velocità di deformazione plastica di snervamento;
3. Il cambiamento della geometria del corpo è insignificante fino all'inizio del collasso (comportamento rigido-plastico).

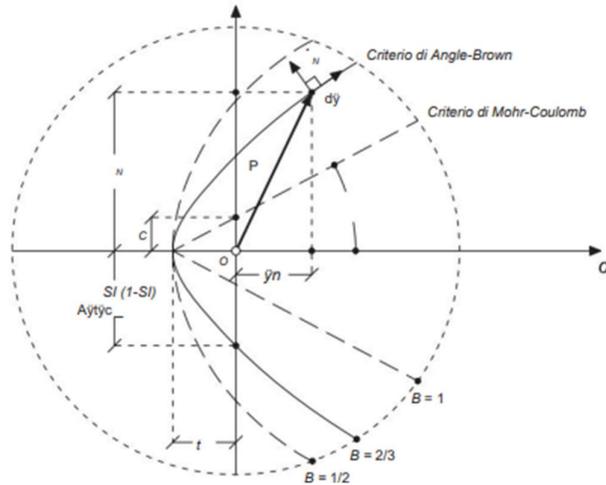
Si procede nello scrivere il criterio generalizzato di Hoek-Brown nel piano di Mohr  $\sigma_n - \tau_n$  con un vettore  $n$  che rappresenta la normale al piano di rottura

$$\tau_n = \pm A \sigma_c [(\sigma_n + \sigma_t) \sigma_c^{-1}]^B$$

$$\{A, B \in (0,1) \subseteq \mathbb{R}^+, \sigma_c \geq \sigma_t \geq 0\}$$

(3)

con A e B parametri adimensionali che caratterizzano l'ammasso roccioso e  $\sigma_c$  e  $\sigma_t$  sollecitazioni di compressione e trazione attiva.



**Fig. 4.13** Cerchio di Mohr

È possibile fare una interpretazione meccanica del coefficiente A quando si fanno coincidere i criteri di Mohr-Coulomb e Hoek-Brown

$$\{ B = 1, A = \tan \Phi, \sigma_t = c(\tan \Phi)^{-1} \}$$

$$\Rightarrow \tau^{M-C} = \pm A (\sigma_n + \sigma_t) = \pm \sigma_n \tan \Phi \pm c$$

(4)

con  $\Phi$  che rappresenta l'angolo di attrito e c la coesione dell'ammasso.

Assumendo per i materiali standard che il potenziale plastico F coincida con la curva dei rendimenti di Hoek-Brown e considerando il semipiano in cui  $\tau_n$  è positivo si ha

$$F = \tau_n - A \sigma_c [(\sigma_n + \sigma_t) \sigma_c^{-1}]^B$$

(5)

Così la velocità di deformazione plastica può essere scritta come

$$\dot{\epsilon}_n = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma} = -\lambda A B [(\sigma_n + \sigma_t) \sigma_c^{-1}]^{(B-1)}$$

$$\dot{\gamma}_n = \lambda \frac{\partial F}{\partial \tau} = \lambda$$

(6)

dove  $\lambda$  è un parametro scalare.

Lo scopo è quello di indagare sui crolli causati dalla gravità, perciò, si focalizza l'attenzione sui campi delle velocità verticali ammissibili assunti

in direzione  $y$  in fig. 4.13. Con l'equazione  $y = f(x)$ , si sta considerando un qualsiasi elemento appartenente alle curve che definiscono un possibile blocco collassante nel sistema di riferimento  $x$ - $y$ . È quindi possibile scrivere le velocità di deformazione plastica

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_n &= (\dot{u} / w) [1 + f'(x)^2]^{-1/2} \\ \dot{\gamma}_n &= -(\dot{u} / w) f'(x) [1 + f'(x)^2]^{-1/2}\end{aligned}\quad (7)$$

in cui  $w$  è lo spessore della zona plastica di distacco. Il punto  $o$  denota la il differenziale rispetto al tempo e  $f'$  l'apice la derivata prima rispetto a  $x$ .

Le componenti di (6) e (7) devono essere uguagliate; dalla seconda equazione si ha

$$\lambda = -(\dot{u} / w) f'(x) [1 + f'(x)^2]^{-1/2}\quad (8)$$

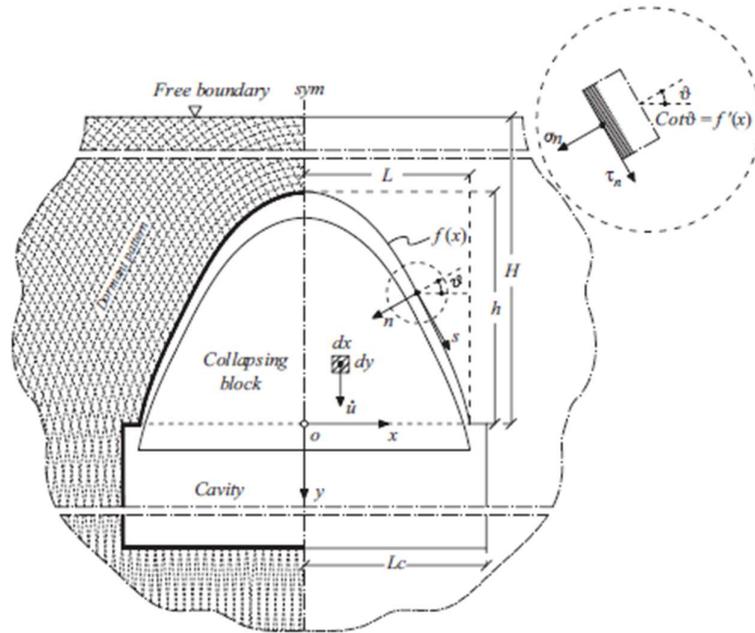


Fig. 4.14 Schema di collasso

In base a quanto detto, la componente dello sforzo normale può essere espressa come una funzione dei parametri meccanici di Hoek-Brown e della prima derivata della curva di rottura sconosciuta,  $f'(x)$ , cioè:

$$\sigma_n = -\sigma_t + \sigma_c [(AB)f'(x)]^{1/(1-B)}\quad (9)$$

A collasso imminente, la densità di dissipazione delle forze interne sulla superficie distaccante

$$\begin{aligned} \dot{D}_i = \sigma_n \dot{\epsilon}_n + \tau_n \dot{\gamma}_n = \{ & [-\sigma_t + \sigma_c [(AB)f'(x)]^{1/(1-B)} x \\ & (1-B^{-1}) f'(x)^{1/(1-B)}] / [w(1+f'(x)^2)^{1/2}] \} \dot{u} \end{aligned} \quad (10)$$

Mentre l'entità dei carichi applicati per unità di lunghezza sulla superficie di rottura  $\dot{W}_e$  è

$$\dot{W}_e = \rho f(x) \dot{u} \quad (11)$$

$\rho$  è il peso per unità di volume dell'ammasso roccioso.

Il processo di collasso effettivo può essere determinato attraverso la minimizzazione della dissipazione totale  $\dot{D}$  nello spazio funzionale di tutti gli elementi ammissibili di rottura  $f(x)$ . In altre parole, per trovare la configurazione o la condizione in cui si verifica il collasso, è necessario cercare il percorso di minima dissipazione di energia all'interno delle diverse possibilità di rottura consentite dal sistema. Considerando il blocco cadente simmetrico rispetto all'asse  $y$ , la dissipazione totale al collasso imminente risulta essere:

$$\begin{aligned} \dot{D}_i [f(x), f'(x), x] &= \int_0^S \dot{D}_i ds - \int_0^L \dot{W}_e dx = \\ &= \int_0^L (\dot{D}_i \sqrt{1+f(x)^2} - \dot{W}_e) dx = \\ &= \int_0^L A[f(x), f'(x), x] dx \end{aligned} \quad (12)$$

in cui  $ds = \sqrt{1+f(x)^2} dx$  è la lunghezza elementare della curva di rottura,  $S$  è metà della lunghezza  $f(x)$  e  $L$  la sua proiezione orizzontale.  $A = A[f(x), f'(x), x]$  è il funzionale

$$\begin{aligned} A = A[f(x), f'(x), x] &= [-\sigma_t + \sigma_c [(AB)f'(x)]^{1/(1-B)} x \\ & (1-B^{-1}) f'(x)^{1/(1-B)} - \rho f(x)] \dot{u} \end{aligned} \quad (13)$$

il cui integrale  $\dot{D}_i$  sull'intervallo  $[0, L]$  deve essere reso un estremo. Il problema è quello classico del calcolo delle variazioni, cioè, trovare una funzione,  $y = f(x)$ , nelle condizioni di regolarità, che renda l'integrale (12) un

valore stazionario. La condizione  $f(x=L) = 0$  è qui considerata implicitamente come un vincolo. Vale anche la pena di evidenziare che sia il moltiplicatore scalare,  $\lambda$ , sia lo spessore elementare,  $w$ , della zona plastica naturalmente diminuiscono nei calcoli e quindi non sono necessarie ipotesi aggiuntive al loro riguardo.

La prima variazione della dissipazione totale  $\dot{D}$  può essere scritta come segue:

$$\delta \dot{D} = \delta \dot{D} [f(x), f'(x), x] = 0 \Rightarrow \frac{\partial A}{\partial f(x)} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial A}{\partial f'(x)} \right) = 0 \quad (14)$$

e dall'Eq. (13) si ha

$$\frac{\partial A}{\partial f(x)} = -\rho \dot{u}$$

$$\frac{\partial A}{\partial f(x)} = \sigma_c [(AB)f'(x)]^{1/(1-B)} B^{-1} f'(x)^{B/(1-B)} \dot{u} \quad (15)$$

Perciò, in virtù dell'Eq. (14), la forma esplicita dell'equazione di Eulero-Lagrange per il problema in esame risulta

$$\delta \dot{D} = 0 \Rightarrow \dot{u} [ \psi f'(x)^{(2B-1)/(1-B)} f'(x) - \rho ] = 0, \forall \dot{u} \in V \quad (16)$$

dove

$$\psi = \sigma_c (1-B)^{-1} (AB)^{1/(1-B)} > 0, \forall [A, B] \in ]0,1[ \quad (17)$$

$V$  sta per lo spazio di tutti i campi di velocità di gravità ammissibili. Eq. (16) è un'equazione differenziale del secondo ordine fortemente non lineare nella funzione incognita  $f(x)$ . Una prima integrazione produce

$$[ \psi (1-B) B^{-1} ] f'(x)^{B/(1-B)} - \rho x - \tau_0 = 0 \quad (18)$$

dove  $\tau_0$  è la costante da determinare. Si può notare che essendo  $f(x=0) = A^{-1/B} B^{-1} \sigma_c^{(B-1)} B \tau_0^{(B-1)/B}$ , si ottiene  $\tau_0 \propto f'(x=0)$ . Il fatto che l'Eq. (18) consente di scrivere solo la prima derivata di  $f(x)$ , permette di scrivere

$$f'(x) = [B\psi^{-1}(1-B)^{-1}]^{(1-B)/B} (\rho x + \tau_0)^{(1-B)/B} \quad (19)$$

e un'ulteriore integrazione dell'Eq. (20) fornisce la soluzione della forma finale di  $f(x)$

$$f(x) = k (x + \rho^{-1} \tau_0)^{1/B} - h \quad (20)$$

dove

$$k = B \left[ \frac{B\rho}{\psi(1-B)} \right]^{(1-B)/B} = A^{-1/B} \left( \frac{\rho}{\sigma c} \right)^{(1-B)/B} > 0, \\ \forall [A, B] \in ]0, 1[ \quad (21)$$

$h$  rappresenta una costante di integrazione alla quale si associa l'altezza massima del blocco che collassa. Sostituendo (20) e (21) nell'Eq. (13) si ha

$$A = [\alpha - \beta (x + \rho^{-1} \tau_0)^{1/B}] \dot{u} \quad (22)$$

con

$$\alpha = \rho h - \sigma_t, \quad \beta = B^{-1} (\rho A^{-1})^{1/B} \sigma_c^{(B-1)/B} = k \rho B^{-1} \quad (23)$$

e in virtù delle Eq. (12), (22) e (23), la dissipazione totale  $\dot{D}$  assume la forma esplicita

$$\dot{D} = \int_0^L A dx = \{ \alpha L - \beta B (1+B)^{-1} [(L + \rho^{-1} \tau_0)^{(1+B)/B} - (\rho^{-1} \tau_0)^{(1+B)/B}] \} \dot{u} \quad (24)$$

in cui  $L$  è ancora incognita. A causa del significato geometrico,  $L$  può essere messo in relazione con gli altri parametri del problema poiché rappresenta l'intersezione tra la curva  $y=f(x)$  con il piano  $y=0$ ; eguagliano a zero l'espressione (20) e considerando la radice positiva si ha:

$$f(x) = k (x + \rho^{-1} \tau_0)^{1/B} - h = 0 \Rightarrow L = (k^{-1} h)^B - \rho^{-1} \tau_0 \quad (25)$$

Sostituendo nell'Eq. (24) si ha

$$\dot{D} = \{ (k^{-1} h)^B [\alpha - \beta B (1+B)^{-1} k^{-1}] + (\rho^{-1} \tau_0) x [\alpha - \beta B (1+B)^{-1} (\rho^{-1} \tau_0)^{1/B}] \} \dot{u} \quad (26)$$

Dal punto di vista matematico e in virtù dell'Eq. (26) tutte le coppie di valori  $\{L, h\}$  che verificano la condizione

$$\{L = (k^{-1}h)^B - \rho^{-1}\tau_0, h\} | \dot{D} = 0 \quad (27)$$

rappresentano i meccanismi di collasso. Per una soluzione del problema fisico completo, è essenziale che i valori calcolati per le componenti di sollecitazione, come indicati nelle equazioni (3) e (9), soddisfino anche le equazioni di equilibrio sulla superficie di rottura; ciò comporta si conseguenza che le forze e i momenti risultanti sul blocco o sulla zona di rottura devono essere in equilibrio. Queste equazioni possono essere scritte nel sistema di riferimento locale  $\{n, s\}$  come

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma n}{\partial n} + \frac{\partial \tau n}{\partial s} = b_n = \rho \sin \theta \\ \frac{\partial \tau n}{\partial n} = b_s = \rho \cos \theta \end{array} \right. \quad (28)$$

dove  $n$  e  $s$  rappresentano rispettivamente la direzione normale e tangente alla curva  $y=f(x)$ . Inoltre,  $\cot \theta = f'(x)$  e  $b=[b_n, b_s]^T$  è il vettore forza del corpo. La seconda equazione della (28) impone l'equilibrio lungo la direzione tangente, ossia  $y=f(x)$ ; la prima impone l'equilibrio nella direzione normale coinvolgendo così la distribuzione incognita delle tensioni nello spessore della zona plastica. Sostituendo le equazioni (9) e (20) in (3) e in virtù delle componenti del vettore normale unitario  $n = [\cos \theta, -\sin \theta]^T$  si trova che l'equilibrio nella direzione tangente alla curva  $y=f(x)$  è sempre soddisfatto, ossia

$$\begin{aligned} \tau_n &= \sigma_c (AB)^{1/(1-B)} [(1-B)\psi]^{-1} = \rho x + \tau_0 \\ \Leftrightarrow \frac{\partial \tau n}{\partial n} &= \nabla \tau_n \cdot n \end{aligned} \quad (29)$$

con  $\nabla \tau_n = [\partial \tau n / \partial x ; \partial \tau n / \partial y]^T$ .

La simmetria del problema può essere utilizzata per soddisfare le condizioni di equilibrio in  $\{x=0 ; y= -h\}$ . Se la curva di rottura è supposta simmetrica rispetto all'asse  $y$ , l'equilibrio delle sollecitazioni sul piano di simmetria  $x=0$  richiede che la componente di taglio si annulli su tale piano

$$\tau_{xy} (x=0, y= -h) = 0 \quad (30)$$

Perciò, considerando che le relazioni tra le componenti dello stress si ha

$$\tau_{xy} = \tau_n \cos 2\theta - \frac{1}{2} \sigma_n \sin 2\theta$$

(31)

Ricordando che  $\cot \theta = f'(x)$  si ha che

$$\cos 2\theta = \frac{f'(x)^2 - 1}{f'(x)^2 + 1}, \quad \frac{1}{2} \sin 2\theta = \frac{f'(x)^2}{f'(x)^2 + 1}$$

$$\cot \theta|_{x=0} = f'(x=0) = Q \tau_0^{(1-B)/B}$$

(32)

in cui  $Q = [B(1-B)^{-1}\psi^{-1}]^{(1-B)/B}$ . dall'Eq. (31) segue che

$$(Q^2 \tau_0^{2(1-B)/B} + 1)^{-1} \{ \tau_0(Q^2 \tau_0^{2(1-B)/B} - 1) + [\sigma_t - \sigma_c(AB Q^{-1})^{1/(1-B)} \tau_0^{1/B}] Q \tau_0^{(1-B)/B} \} = 0$$

$$\Rightarrow \tau_0 = 0$$

(33)

Sostituendo l'Eq. (33) nell'Eq. (26) si scrive

$$\dot{D} = 0 \Rightarrow \alpha - \beta B(1+B)^{-1} k^{-1} h = 0 \Rightarrow h = (\rho B)^{-1} (1+B) \sigma_t$$

(34)

e di conseguenza

$$L = (k^{-1} h)^B = AB^{-B} (1+B)^B \rho^{-1} \sigma_c^{1-B} \sigma_t^B$$

(35)

M. Fraldi e F. Guarracino ottengono quindi l'espressione della superficie di rottura

$$f(x) = [A - 1(\rho \sigma_c^{-1})^{1-B}]^{1/B} x^{1/B} - (\rho B)^{-1} (1+B) \sigma_t$$

(36)

Si può calcolare il peso complessivo del blocco che crolla per unità di lunghezza, P, come

$$P = -2 \int_0^L \rho f(x) dx = 2\rho L h (1+B)^{-1} = 2A \rho^{-1} (1+B)^B \sigma_c^{1-B} [B^{-1} \sigma_t]^{1+B}$$

(37)

L'equazione (36) suggerisce che in ogni ammasso roccioso o terreno che segue il criterio di Hoek-Brown, la pendenza della curva di rottura  $y=f(x)$  nel punto  $x=0$  deve essere orizzontale. In altre parole, nel punto in cui il carico è zero, la curva di rottura deve avere una pendenza orizzontale. L'interpretazione di questa equazione può essere che l'espressione della curva di rottura fornita dall'equazione (36) rappresenta una rotazione di  $\pi/2$  della superficie di snervamento di Hoek-Brown nel piano x-y; questa rotazione crea

una relazione diretta tra il piano s/t (sforzo normale/tangenziale) e il limite del blocco che sta per crollare. Ciò appare evidente dall'inverso dell'Eq. (36) impostando

$$\begin{aligned}\tau^* &= x, \sigma^* = f(x) \\ \sigma_c^* &= \sigma_c \rho^{-1} \\ \sigma_t^* &= \sigma_t \rho^{-1} (1+B) B^{-1}\end{aligned}\tag{38}$$

e osservando che

$$x = x(f) \Rightarrow \tau^* = A \sigma_c^* [(\sigma^* + \sigma_t^*) \sigma_c^{*-1}]^B\tag{39}$$

Questa espressione può rivelarsi utile per validare provvisoriamente i parametri meccanici di Hoek-Brown tramite una semplice analisi inversa una volta osservata in qualche modo la forma del blocco che collassa

$$\sigma^* = f(x).$$

Sia  $L_c$  la metà dello scavo, il collasso del tetto si verifica se viene soddisfatta la seguente disuguaglianza:

$$L_c \geq L = AB^{-B}(1+B)^B \rho^{-1} \sigma_c^{1-B} \sigma_t^B\tag{40}$$

Un tunnel può definirsi profondo se la distanza dal tetto della cavità alla superficie superiore della parete rocciosa, diciamo  $H$ , soddisfa la seguente disuguaglianza:

$$H \geq h = (\rho B)^{-1} (1+B) \sigma_t\tag{41}$$

M. Fraldi e F. Guarracino, nelle conclusioni di “Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek–Brown failure criterion” affermano che uno scavo può essere considerato profondo non solo in base alla geometria del problema, ma anche in relazione a tutte le proprietà fisiche della parete rocciosa, che sono funzioni dei parametri  $\{\rho, A, B, \sigma_c, \sigma_t\}$ . Infine, considerando che la roccia segue il criterio di Hoek-Brown e in presenza di campi di rottura con velocità verticali, è evidente che per tunnel profondi di forma rettangolare il collasso avviene una volta soddisfatte le disuguaglianze (40) e (41), indipendentemente dalla lunghezza effettiva dello scavo,  $L_c$ . Si può perciò immaginare che la forma delle zone di rottura del

masso roccioso sia un modello di collasso latente che può essere attivato dal processo di scavo.

#### **4.4 Sistema di ventilazione nei tunnel**

L'ambiente confinato dei tunnel rende necessaria la gestione dell'aria, rendendo la ventilazione un elemento di vitale importanza per regolare il flusso dell'aria, la temperatura e la qualità dell'ambiente interno. Un sistema di ventilazione efficace permette di prevenire l'accumulo di inquinanti, gas tossici e calore eccessivo, garantendo condizioni di lavoro e di transito ottimali. La ventilazione deve quindi garantire che gli utenti dello spazio sotterraneo possano vivere al suo interno con la certezza che i livelli di qualità dell'aria siano mantenuti al di sotto dei valori massimi consentiti dalle normative di ciascun paese, attraverso un rinnovo di aria adeguata. Se la ventilazione è insufficiente o il sistema di ventilazione non funziona correttamente, l'aria inquinata può accumularsi e quindi le concentrazioni di inquinanti tendono ad aumentare e rappresentano un rischio elevato per la salute delle persone.

Il sistema di ventilazione può adottare diverse modalità, che includono l'approccio naturale, quello meccanico o una combinazione di entrambi, e deve essere progettato in base alle specifiche caratteristiche e all'uso previsto della struttura. Per la valutazione della ventilazione si utilizza il tasso di ricambio di aria all'ora (ACH) che rappresenta il rapporto tra la portata d'aria che entra nello spazio chiuso e il suo volume, ossia il numero di volte all'ora in cui viene espulso un quantitativo di aria pari al volume dello spazio chiuso. Nelle stazioni e nei sistemi della metropolitana è raccomandato un ricambio di aria compreso tra 6 e 8 ricambi orari.

Fin dai tempi antichi, vengono impiegati sistemi di ventilazione naturale che sfruttano le variazioni di pressione interiore causate dalla diminuzione della temperatura esterna durante le ore notturne. La temperatura all'interno degli spazi sotterranei è strettamente correlata alla temperatura del terreno a una profondità media e alla temperatura dell'aria esterna. È possibile identificare due periodi nel corso dell'anno con caratteristiche differenti: un periodo freddo e un periodo caldo.

*Periodo freddo ( $T_{ext} < T_{int}$ )*

La temperatura esterna è al di sotto della temperatura del tunnel per gran parte del giorno e della notte: il tunnel sarà soggetto a un flusso di aria fredda (più pesante) che proviene dall'esterno.

*Periodo caldo ( $T_{ext} > T_{int}$ )*

La temperatura esterna è al di sopra della temperatura del tunnel per gran parte del giorno e della notte: la ventilazione si riduce in maniera drastica e le pareti interne acquisiscono temperature progressivamente molto diverse a causa del trasferimento del calore.

Il sistema di ventilazione meccanizzato sfrutta macchine e sensori che rilevano la qualità dell'aria per garantire un ambiente sicuro nelle strutture sotterranee. Lungo il tunnel si trovano bocchette di aspirazione e di scarico posizionate in maniera strategica; le prime prelevano l'aria viziata o inquinata dalla galleria, le seconde espellono l'aria trattata o fresca nell'ambiente esterno. Lo spostamento dell'aria è effettuato tramite l'ausilio di ventilatori che spingono l'aria; possono essere posizionati a seguito delle bocchette e regolati in base alle esigenze.



**Fig. 4.15** Ventilatori in galleria

L'aria è trasportata verso le bocchette di aspirazione tramite condotti che devono essere progettati in maniera opportuna poiché forma e dimensione influenzano la velocità con cui l'aria si sposta. I condotti devono essere realizzati con materiali che garantiscano la durabilità, la resistenza agli agenti atmosferici e corrosivi, al flusso dell'aria; per questo motivo si scelgono materiali come l'acciaio, il PVC, la plastica a base di resine o materiali compositi che combinano le diverse proprietà.



**Fig. 4.16** Tubo di aspirazione

Possono essere installati dei filtri per la rimozione delle particelle di polvere, di inquinanti e di altre impurità in modo tale che l'ambiente resti pulito e salubre.

I recenti sistemi di ventilazione sono dotati di controlli automatizzati che permettono di ottimizzare la ventilazione in tempo reale. I sistemi sfruttano i sensori di rilevamento per verificare parametri come la temperatura, l'umidità, la concentrazione di gas e la presenza di persone.

È opportuno verificare le condizioni dell'aria già nella fase di scavo: è importante controllare se durante questa fase ci sia amianto nel tunnel. L'amianto è un materiale altamente nocivo e cancerogeno che costituisce un rischio elevato per la salute umana in quanto è la causa di tumori altamente mortali all'apparato respiratorio. I sensori di rilevamento possono essere utilizzati a partire dalla fase di avvio dei lavori per effettuare una valutazione

preventiva per individuare le zone a rischio e pianificare misure di sicurezza adeguate. Durante le operazioni i sensori possono essere posizionati strategicamente e trasmettono in tempo reale i dati a un sistema di controllo. I sensori emettono allarmi sonori e visivi in caso di concentrazioni pericolose per avvisare gli operatori in modo tale da adottare i corretti dispositivi di protezione. Tra i sensori utilizzati ci sono quelli per le polveri sottili che rilevano la presenza di particelle di polvere, compreso l'amianto, quelli che rilevano direttamente l'amianto e quelli portatili che vengono indossati dai lavoratori o posizionati in vari punti della galleria. Alcuni tipi di amianto emettono radiazioni alfa, perciò, si dispongono anche dei sensori che captano le radiazioni e monitorano i livelli di esposizione.

#### **4.5 Costi e tempi di realizzazione**

I costi correlati alla costruzione di tunnel sotterranei possono variare significativamente in base a diversi fattori, tra cui la lunghezza del tunnel, il diametro, il terreno circostante, le metodologie di scavo impiegate, la complessità del progetto e le condizioni ambientali. Gli investimenti richiesti per la realizzazione di tunnel sotterranei possono includere il costo dei materiali, l'equipaggiamento, la manodopera specializzata, i servizi ausiliari come la ventilazione e l'illuminazione, le misure di sicurezza.

I progetti di tunneling raramente soddisfano i requisiti di budget iniziali. L'incremento dei costi è principalmente attribuibile a valutazioni errate del terreno, che spesso causano ritardi nella fase di scavo. A differenza di altre strutture, la costruzione di tunnel è particolarmente suscettibile ai rischi associati allo scavo, oltre ai parametri tradizionali che influenzano il costo totale. Alcuni dei principali fattori interni che contribuiscono all'aumento dei costi e dei tempi di realizzazione includono modifiche nella pianificazione del progetto, potenziali cedimenti durante lo scavo delle gallerie, ritardi nella consegna di materiali e attrezzature, eventi ad alto rischio imprevedibili, guasti delle attrezzature e conflitti tra l'ente appaltante e l'impresa esecutrice. È opportuno considerare metodi efficaci per la gestione del rischio per ridurre costi eccessivi e tempi molto lunghi: devono essere valutati i rischi di progetto con un approccio qualitativo e quantitativo.

Oggi, l'analisi del rischio si basa sull'applicazione dei principi della teoria della probabilità e su concetti statistici. Il modello di valutazione del rischio stocastico, utilizzato per valutare gli investimenti nei progetti di tunneling, parte dal presupposto che i dati di base non siano completamente deterministici ma abbiano una componente probabilistica. Questo modello di valutazione del rischio segue un approccio a due fasi. Nella prima fase, il problema viene affrontato utilizzando dati di input deterministici e assumendo che tutti i dati iniziali siano noti. Nella seconda fase, la soluzione del problema viene riesaminata adottando un approccio probabilistico. Nonostante i costi elevati e i tempi significativi di realizzazione gli investimenti nell'ambito delle infrastrutture sotterranee generano benefici per la mobilità e profitti a lungo termine. La realizzazione di tunnel contribuisce a una diminuzione dei tempi di percorrenza e della congestione del traffico in superficie, migliorando al contempo il servizio di trasporto pubblico. Pertanto, un'accurata valutazione dei costi e dei tempi, accompagnata da una gestione efficiente, costituisce un elemento chiave per il successo e la sostenibilità dell'infrastruttura.

## 5 Analisi topologica tramite la Teoria dei Grafi

---

### 5.1 Concetti fondamentali della Teoria dei Grafi

La teoria dei grafi rappresenta un campo matematico fondamentale per l'analisi e la rappresentazione delle relazioni tra oggetti attraverso nodi e collegamenti.

Una struttura razionale detta “grafo” è composta da un insieme finito di elementi detti “nodi” o “vertici” uniti da un insieme di relazioni rappresentate da segmenti di retta o di curva tra coppie di oggetti detti “archi” o “spigoli”. Dal punto di vista matematico è possibile utilizzare la seguente notazione per descrivere un grafo:

$$G(N, A)$$

dove  $N$  è l'insieme dei nodi mentre  $A$  indica l'insieme degli archi che compongono il grafo  $G$ .

L'origine della teoria dei grafi è attribuita a un lavoro di Eulero risalente al 1736 che risolveva il quesito matematico dei ponti di Königsberg. La città di Königsberg si sviluppava sulle rive del fiume Pregel e sulle due isole formate dal fiume in quell'area e nel 1700 era attraversata da sette ponti. Si indica con  $A$  la prima isola, con  $B$  la seconda e con  $C$  e  $D$  le due rive. Si elencano i ponti presenti in Fig. 5.1:

- 2 ponti tra  $A$  e  $D$ ;
- 2 ponti tra  $A$  e  $C$ ;
- 1 ponte tra  $A$  e  $B$ ;
- 1 ponte tra  $C$  e  $B$ ;
- 1 ponte tra  $D$  e  $B$ .

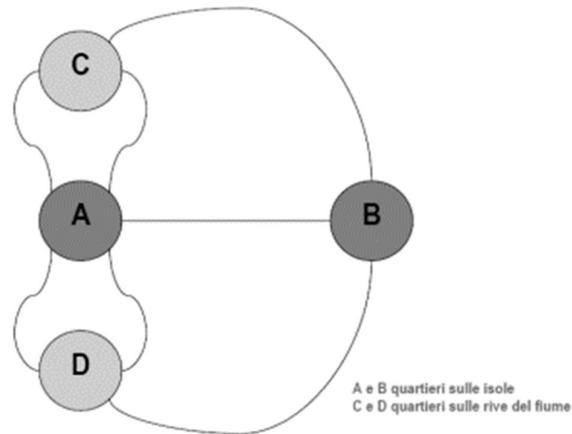


Fig. 5.1 Schema del problema matematico dei ponti di Königsberg

Il problema consisteva nella possibilità di definire un percorso che permettesse a ciascuno abitante di partire dalla propria abitazione e di tornarci dopo aver attraversato ciascun ponte una sola volta. Eulero, al fine di dimostrare che il problema non aveva soluzioni, effettuò una trasformazione sostituendo ogni riva del fiume con un nodo e ogni ponte con un arco. Così facendo si passa dalla soluzione del problema all'analisi e allo studio topografico, ossia lo studio delle proprietà delle forme e delle figure, del grafo. Eulero, durante l'analisi delle diverse configurazioni possibili, osservò che il problema ammetteva una soluzione nei casi in cui ciascun nodo aveva un grado pari, cioè quando il numero di archi collegati a ciascun nodo era un numero pari. Al contrario, il problema non ammetteva soluzione nei casi in cui almeno un nodo aveva un grado dispari, ovvero quando il numero di archi incidenti su un nodo era un numero dispari. Eulero affermò tramite il teorema che la condizione necessaria e sufficiente affinché un grafo sia percorribile completamente partendo da un nodo e ritornandovi passando una volta solamente per ciascun arco è che esista un percorso fra ogni coppia di nodi e che ogni nodo sia toccato da un numero pari di archi. Il percorso richiesto dal problema matematico dei ponti di Königsberg è possibile se e solo se i nodi hanno archi in numero pari. Un cammino che deve iniziare e finire nello stesso nodo è detto ciclo euleriano, altrimenti si definisce come cammino euleriano; il grafo che ammette almeno un ciclo euleriano è detto grafo euleriano. Quindi si può affermare che dato un grafo  $G = (N, A)$  se esiste un

cammino di  $G$  che percorre tutti gli archi di  $G$  una e una sola volta si dice che  $G$  è un grafo euleriano.

## 5.2 Applicazione della Teoria dei Grafi alla struttura dei formicai

La teoria dei grafi è uno strumento che può essere utilizzato per analizzare le relazioni presenti nei sistemi naturali e in quelli artificiali. La teoria dei grafi può essere applicata per ampliare la comprensione delle dinamiche presenti nelle colonie. Tramite l'utilizzo dei grafi possono essere rivelate nuove prospettive sulla struttura, sulla determinazione dei percorsi più brevi all'interno dei nidi, sull'organizzazione sociale.

La rappresentazione delle interazioni tra le formiche attraverso la teoria dei grafi permette di valutare in modo completo la complessa organizzazione sociale delle formiche e la cooperazione che le tiene unite. Ogni formica può essere vista come un nodo e ogni relazione o ruolo assegnato all'interno del nido come un arco; questa rappresentazione visiva consente di identificare le dinamiche di collaborazione e i ruoli di ogni formica. In questo modo si evidenzia la sinergia tra gli insetti analizzando il loro modo di relazionarsi e organizzarsi per garantire l'ampliamento e la sopravvivenza della colonia: ogni formica opera per assicurare il funzionamento armonioso dell'intera comunità.

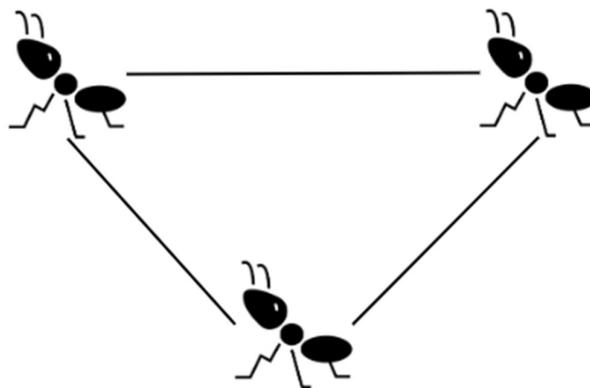


Fig. 5.2 Rappresentazione grafica delle interazioni sociali nel formicaio con un grafo

L'approccio della teoria dei grafi permette di evidenziare i percorsi più brevi ossia quelli che le formiche potrebbero preferire per raggiungere le fonti di

cibo, le camere di nidificazione o le zone di interazione sociale. La scelta da parte delle formiche di scegliere percorsi brevi evidenzia la strategia di risparmio dell'energia e ciò consente di esaminare l'approccio di adattamento all'ambiente circostante. La valutazione dei cammini più corti permette di mettere in luce la gerarchia e l'importanza delle diverse parti della colonia: le camere e i corridoi che si trovano sul percorso ottimale sono quelle in cui si svolgono le principali attività.

La teoria dei grafi può essere applicata anche per effettuare una valutazione della struttura del nido e su come le dimensioni varino nel tempo. In questo tipo di analisi le camere costituiscono i nodi mentre i corridoi tra le camere rappresentano gli archi. La connessione tra i nodi riflette le vie di passaggio e le relazioni tra le diverse aree del formicaio. L'applicazione di questa teoria facilita la visualizzazione dei collegamenti tra le camere, la loro disposizione e la variazione dei flussi delle attività degli insetti; ciò evidenzia i nodi centrali e periferici del formicaio. I nodi centrali costituiscono i punti di convergenza per le varie attività delle formiche, come deposito o cura delle larve; i nodi periferici sono costituiti dalle camere in cui si svolgono attività specializzate come la nidificazione. In questo modo si ottiene un modello che consente di valutare le varie parti del formicaio, come queste sono disposte e come interagiscono tra loro. Inoltre, la teoria dei grafi permette di evidenziare la resilienza del sistema e la capacità di adattamento: eliminando uno o più nodi o uno o più archi si valuta la connettività complessiva del formicaio.

In particolare, si può rappresentare in maniera semplificata l'applicazione della teoria dei grafi nel seguente modo:

- Nodi

Camera principale

Camera delle uova

Camera delle larve

Camera delle scorte di cibo

Camera delle discariche

- Archi

Camera principale <-> Camera delle uova

Camera principale <-> Camera delle larve  
 Camera principale <-> Camera delle scorte di cibo  
 Camera principale <-> Camera delle discariche  
 Camera delle uova <-> Camera delle larve  
 Camera delle larve <-> Camera delle scorte di cibo  
 Camera delle scorte di cibo <-> Camera delle discariche

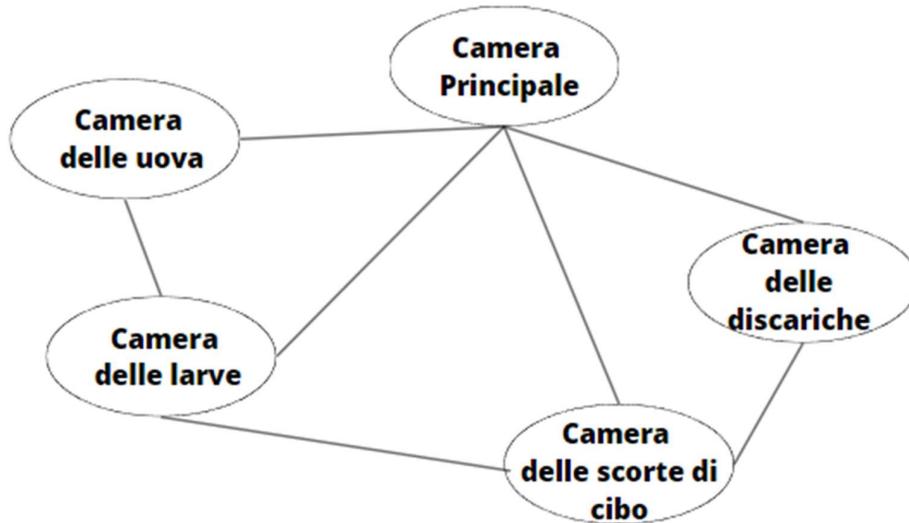


Fig. 5.3 Rappresentazione grafica dell'organizzazione strutturale del formicaio

### 5.3 Applicazione della Teoria dei Grafi alla topologia delle linee metropolitane

L'utilizzo della teoria dei grafi applicata alle reti metropolitane fornisce un approccio fondamentale per cogliere la complessità di tali sistemi di trasporto urbano. Tramite l'applicazione della teoria dei grafi, le reti metropolitane possono essere analizzate in modo sistematico, apportando miglioramenti concreti nell'efficienza, nell'accessibilità e nell'esperienza complessiva dei passeggeri.

La teoria dei grafi consente di rappresentare le stazioni come nodi e le connessioni tra di esse come archi, fornendo una rappresentazione visiva chiara delle interazioni all'interno della rete. I grafi favoriscono l'analisi della topologia delle linee metropolitane, l'individuazione dei nodi di scambio chiave e dei percorsi ottimali e di valutare l'efficienza complessiva del sistema. Attraverso i concetti di nodo e arco è possibile effettuare una

pianificazione degli orari dei treni e ottimizzare le rotte per ridurre i tempi di percorrenza.

Nel contesto delle reti metropolitane, quindi, l'utilizzo della teoria dei grafi consente di realizzare delle rappresentazioni schematiche delle connessioni tra le stazioni. La teoria verrà di seguito applicata alle metropolitane di Londra e Parigi per comprendere al meglio la topologia, i collegamenti chiave e i possibili percorsi.

### 5.3.1 Metropolitana di Londra

La metropolitana di Londra, in inglese denominata London Underground o The Tube, vanta il titolo di essere la più antica rete metropolitana del mondo e la più estesa d'Europa: fu aperta al pubblico il 10 gennaio 1863 e comprende 272 stazioni distribuite in tutta l'area della Grande Londra.

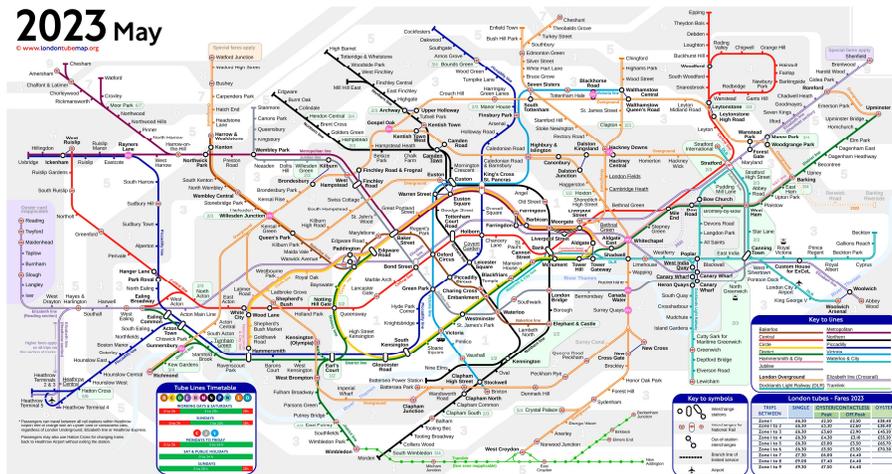


Fig. 5.4 Mappa della metropolitana di Londra

La velocità media dei treni è pari a 33 km/h e si conta che annualmente sui treni salgano circa 28 milioni di passeggeri. La rete presenta un'estensione di 405,2 km e si dirama in 11 linee:

1. *Bakerloo*



Anno di inaugurazione: 1906

Ultima estensione: 1939

Lunghezza (km): 23.2

Stazioni: 25

2. *Central*



Anno di inaugurazione: 1900

Ultima estensione: 1957

Lunghezza (km): 74

Stazioni: 49

3. *Circle*



Anno di inaugurazione: 1863

Ultima estensione: 1905

Lunghezza (km): 27

Stazioni: 39

4. *District*



Anno di inaugurazione: 1868

Ultima estensione: 1839

Lunghezza (km): 64

Stazioni: 60

5. *Hammersmith & City*



Anno di inaugurazione: 1863

Ultima estensione: 1868

Lunghezza (km): 26.5

Stazioni: 29

6. *Jubilee*



Anno di inaugurazione: 1979

Ultima estensione: 1999

Lunghezza (km): 36.2

Stazioni: 27

7. *Metropolitan*



Anno di inaugurazione: 1863

Ultima estensione: 1988

Lunghezza (km): 66.7

Stazioni: 34

8. *Northern*



Anno di inaugurazione: 1890

Ultima estensione: 2021

Lunghezza (km): 58

Stazioni: 52

9. *Piccadilly*



Anno di inaugurazione: 1906

Ultima estensione: 2021

Lunghezza (km): 71

Stazioni: 53

10. *Victoria*



Anno di inaugurazione: 1906

Ultima estensione: 1971

Lunghezza (km): 21

Stazioni: 16

11. *Waterloo & City*



Anno di inaugurazione: 1898

Ultima estensione: 1900

Lunghezza (km): 2.5

Stazioni: 2

Le linee Circle, District, Hammersmith & City e Metropolitan si snodano in sub-superficie con i tunnel situati proprio al di sotto del piano di calpestio. Le altre linee, invece, posizionate in profondità, sono percorse da treni più compatti che viaggiano in gallerie circolari aventi un diametro di circa tre metri e mezzo. Le linee in sub-superficie presentano forma rettangolare dove passano 2 binari e si trovano a profondità non inferiore a 5 m; le linee in profondità sono state realizzate con TBM perciò hanno forma circolare, sono percorribili da un solo treno per volta e si trovano a una profondità non inferiore a 20 m.

Nelle zone periferiche, non sono presenti linee dedicate, ma solo prolungamenti delle principali: questo comporta che per spostarsi da una zona periferica all'altra utilizzando la metropolitana è necessario inevitabilmente

passare attraverso il centro e compiere interscambi tra le diverse linee. La rete metropolitana è principalmente sotterranea, con la maggior parte delle linee che emergono in superficie al di fuori della zona centrale, seguendo tratti su viadotti o al livello del terreno. Solo la linea Victoria e la breve tratta della Waterloo & City costituiscono eccezioni a questa configurazione essendo totalmente sotterranee.

Durante le ore di punta le stazioni risultano molto sovraffollate e spesso diventa necessario chiuderle in maniera temporanea. Capita che i passeggeri non riescano a salire sul primo treno disponibile e comunque risulta difficoltoso trovare posto a sedere; per questo motivo si sviluppano situazioni in cui ogni metro quadro del treno ospita 4 passeggeri. Nonostante sia una delle metro più affollate del mondo, gli incidenti dati dal sovraffollamento sono pochi grazie al monitoraggio costante fornito dalle telecamere.

È evidente quindi che per garantire l'efficienza dei viaggi è necessario studiare i percorsi ottimali passanti per le stazioni chiave, ossia i nodi principali dei grafi. Di seguito verranno mostrati alcuni percorsi ottimali che sono effettuati maggiormente dai passeggeri locali e dai turisti.

- *Da Heathrow a Canary Wharf*

Il percorso prevede che i passeggeri partano dalla stazione metropolitana Heathrow, situata all'interno dell'aeroporto di Heathrow, per raggiungere una delle aree finanziarie più importanti di Londra dove sono presenti aziende, negozi e ristoranti.

La stazione di partenza dell'aeroporto, collocata presso il terminal 5, è il capolinea occidentale della linea Piccadilly; dopo aver viaggiato per 18 fermate, si raggiunge la stazione di Green Park nella quale i passeggeri dovranno cambiare linea spostandosi sulla Jubilee Line. Effettuato il cambio si attraversano 7 stazioni per giungere a quella di Canary Wharf.

STAZIONI		
PICCADILLY LINE	Heathrow terminal 5	PARTENZA
	Heathrow terminal 1, 2 & 3	
	Hatton Cross	
	Hounslow West	
	Hounslow Central	

	Hounslow East	
	Osterley	
	Boston Manor	
	Northfields	
	South Ealing	
	Acton Town	
	Hammersmith	
	Barons Court	
	Earl's Court	
	Gloucester Road	
	South Kensington	
	Knightsbridge	
	Hyde Park Corner	
	Green Park	CAMBIO
JUBILEE LINE	Westminster	
	Waterloo	
	Southwark	
	London Bridge	
	Bermondsey	
	Canada Water	
	Canary Wharf	ARRIVO

**Tabella 5.1** Nodi metropolitana da Heathrow a Canary Wharf

ARCHI	
DA	A
Heathrow terminal 5	Heathrow terminal 1, 2 & 3
Heathrow terminal 1, 2 & 3	Hatton Cross
Hatton Cross	Hounslow West
Hounslow West	Hounslow Central
Hounslow Central	Hounslow East
Hounslow East	Osterley
Osterley	Boston Manor
Boston Manor	Northfields
Northfields	South Ealing
South Ealing	Acton Town
Acton Town	Hammersmith
Hammersmith	Barons Court
Barons Court	Earl's Court
Earl's Court	Gloucester Road
Gloucester Road	South Kensington
South Kensington	Knightsbridge
Knightsbridge	Hyde Park Corner
Hyde Park Corner	Green Park

Green Park	Westminster
Westminster	Waterloo
Waterloo	Southwark
Southwark	Bermondsey
Bermondsey	London Bridge
London Bridge	Canada Water
Canada Water	Canary Wharf

**Tabella 5.2** Archi percorso da Heathrow a Canary Wharf



**Fig. 5.5** Percorso da Heathrow a Canary Wharf

Questo percorso risulta l'unico che collega le due stazioni con linee metropolitane. Si tenga conto della possibilità di arrivare a destinazione, partendo sempre dall'aeroporto, senza effettuare cambi tramite la linea ferroviaria Elizabeth.

- *Da King's Cross St. Pancras a Westminster*

La stazione di partenza, King's Cross St. Pancras, è un'importante stazione ferroviaria e di metropolitana situata nel cuore di Londra: da questa partono i treni Eurostar verso le destinazioni europee come Parigi e Bruxelles e i treni nazionali. La fermata della metro è situata in una zona che è stata oggetto di un progetto di rigenerazione urbana e tra i luoghi di interesse vanta la British Library. La stazione King's Cross St. Pancras è attraversata dalle linee Jubilee, Metropolitan, Northern, Piccadilly, Victoria, Circle, Hammersmith & City. La stazione di arrivo, Westminster, permette di raggiungere la sede del Parlamento, il Big Ben, l'abbazia di Westminster e la London Eye; è attraversata dalle linee Victoria, District e Circle.

La stazione di arrivo e la stazione di partenza sono quindi nodi che vengono attraversati da diverse linee metropolitane ciò comporta che ci siano svariati percorsi che possono essere intrapresi per giungere a destinazione; di seguito ne verranno analizzati alcuni.

#### Percorso 1L

Attraversando 5 stazioni della linea Northern, si giunge nella stazione di London Bridge dove è necessario effettuare un cambio per percorrere 3 fermate della linea Jubilee. Per arrivare a destinazione sono necessari circa 22 minuti.

STAZIONI		
PICCADILLY LINE	King's Cross St. Pancras	PARTENZA
	Russell Square	
	Holborn	
	Covent Garden	
	Leicester Square	
	Piccadilly Circus	
	Green Park	
	Hyde Park Corner	
	Knightsbridge	
	South Kensington	CAMBIO
DISTRICT LINE	Sloane Square	
	Victoria	
	St. James' Park	
	Westminster	ARRIVO

**Tabella 5.3** Nodi percorso 1L da King's Cross St. Pancras a Westminster

ARCHI	
DA	A
King's Cross St. Pancras	Russell Square
Russell Square	Holborn
Holborn	Covent Garden
Covent Garden	Leicester Square
Leicester Square	Piccadilly Circus
Piccadilly Circus	Green Park
Green Park	Hyde Park Corner
Hyde Park Corner	Knightsbridge
Knightsbridge	South Kensington
South Kensington	Sloane Square

Sloane Square	Victoria
Victoria	St. James' Park
St. James' Park	Westminster

Tabella 5.4 Archi percorso 1L da King's Cross St. Pancras a Westminster

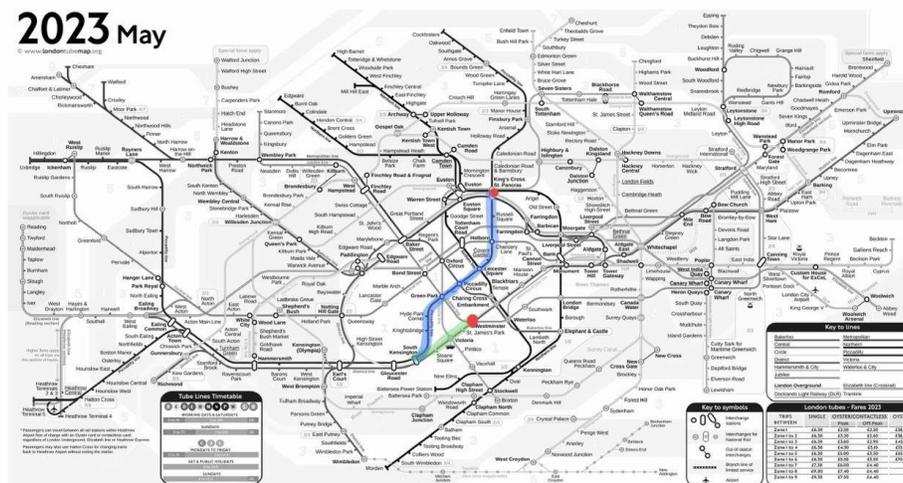


Fig. 5.6 Percorso 1L da King's Cross St. Pancras a Westminster

### Percorso 2L

Utilizzando la linea Victoria si giunge a destinazione effettuando il cambio presso la stazione Green Park sfruttando la linea Jubilee. Per arrivare a destinazione sono necessari circa 15 minuti.

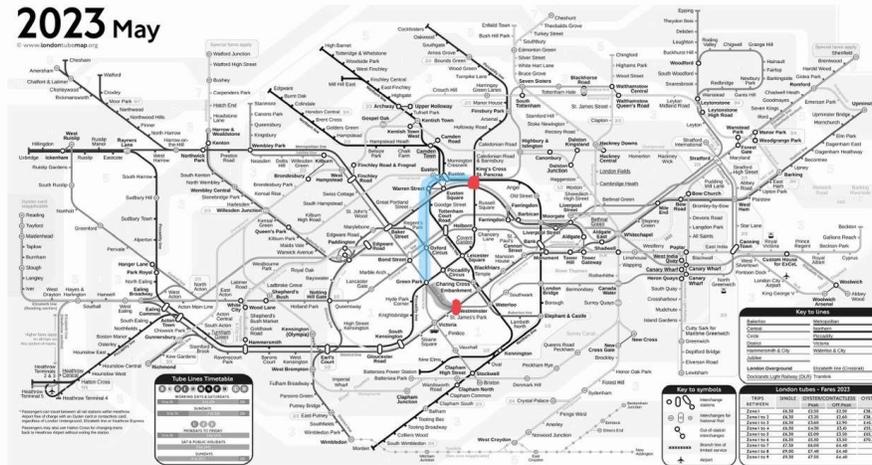
		STAZIONI	
VICTORIA LINE	King's Cross St. Pancras		PARTENZA
	Euston		
	Warren Street		
	Oxford Circus		
	Green Park		
	Piccadilly Circus		
	Green Park		CAMBIO
JUBILEE LINE	Westminster		ARRIVO

Tabella 5.5 Nodi percorso 2L da King's Cross St. Pancras a Westminster

ARCHI	
DA	A
King's Cross St. Pancras	Euston
Euston	Warren Street
Warren Street	Oxford Circus

Oxford Circus	Green Park
Green Park	Piccadilly Circus
Piccadilly Circus	Green Park
Green Park	Westminster

**Tabella 5.6** Archi percorso 2L da King's Cross St. Pancras a Westminster



**Fig. 5.7** Percorso 2L da King's Cross St. Pancras a Westminster

### Percorso 3L

Con la linea Piccadilly si giunge a Westminster spostandosi sulla linea Jubilee ancora una volta con un cambio nella stazione Green Park. Per arrivare a destinazione sono necessari circa 15 minuti.

STAZIONI		
PICCADILLY LINE	King's Cross St. Pancras	PARTENZA
	Russell Square	
	Holborn	
	Covent Garden	
	Leicester Square	
JUBILEE LINE	Piccadilly Circus	CAMBIO
	Green Park	
JUBILEE LINE	Westminster	ARRIVO

**Tabella 5.7** Nodi percorso 3L da King's Cross St. Pancras a Westminster

ARCHI	
DA	A
King's Cross St. Pancras	Russell Square
Russell Square	Holborn

Holborn	Covent Garden
Covent Garden	Leicester Square
Leicester Square	Piccadilly Circus
Piccadilly Circus	Green Park
Green Park	Westminster

Tabella 5.8 Archi percorso 3L da King's Cross St. Pancras a Westminster

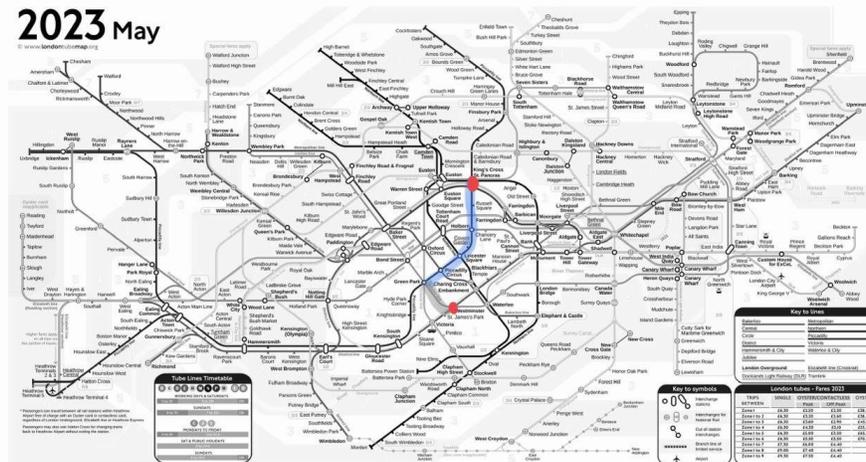


Fig. 5.8 Percorso 3L da King's Cross St. Pancras a Westminster

### Percorso 4L

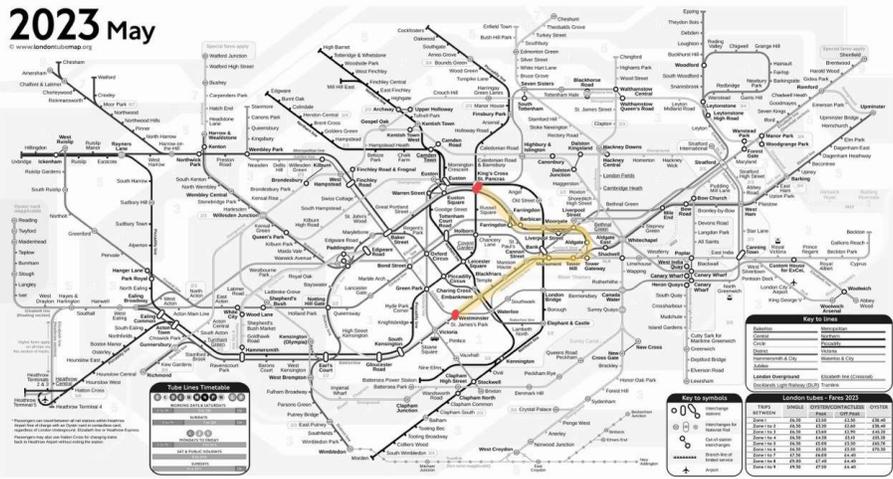
Utilizzando i treni della linea Circle si parte dalla stazione di King's Cross St. Pancras e si giunge in maniera diretta alla fermata di arrivo passando per 13 fermate. Per arrivare a destinazione sono necessari circa 24 minuti.

STAZIONI		PARTENZA
CIRCLE LINE	King's Cross St. Pancras	
	Farringdon	
	Barbican	
	Moorgate	
	Liverpool Street	
	Aldgate	
	Tower Hill	
	Monument	
	Cannon Street	
	Maison House	
	Blackfriars	
	Temple	
	Embarkment	

**Tabella 5.9** Nodi percorso 4L da King's Cross St. Pancras a Westminster

ARCHI	
DA	A
King's Cross St. Pancras	Farringdon
Farringdon	Barbican
Barbican	Moorgate
Moorgate	Liverpool Street
Liverpool Street	Aldgate
Aldgate	Tower Hill
Tower Hill	Monument
Monument	Cannon Street
Cannon Street	Maison House
Maison House	Blackfriars
Blackfriars	Temple
Temple	Embankment
Embankment	Westminster

**Tabella 5.10** Archi percorso 4L da King's Cross St. Pancras a Westminster



**Fig. 5.9** Percorso 4L da King's Cross St. Pancras a Westminster

Percorso 5L, 6L, 7L

In questo caso dal nodo di partenza si possono prendere i treni della linea Circle (percorso 5L) o della Hammersmith & City (percorso 6L) o Metropolitan (percorso 7L) sino alla stazione Baker Street e poi proseguire sulla linea Jubilee verso Westminster. Per arrivare a destinazione sono necessari circa 17 minuti.

CIRCLE O METROPOLITAN O HAMM'SMITH&CITY LINE	STAZIONI	
	King's Cross St. Pancras	PARTENZA
	Euston Square	
	Great Portland Street	
JUBILEE LINE	Baker street	CAMBIO
	Bond Street	
	Green Park	
	Westminster	ARRIVO

Tabella 5.11 Nodi percorso 5L, 6L, 7L da King's Cross St. Pancras a Westminster

ARCHI	
DA	A
King's Cross St. Pancras	Euston Square
Euston Square	Great Portland Street
Great Portland Street	Baker street
Baker street	Bond Street
Bond Street	Green Park
Green Park	Westminster

Tabella 5.12 Archi percorso 5L, 6L, 7L da King's Cross St. Pancras a Westminster

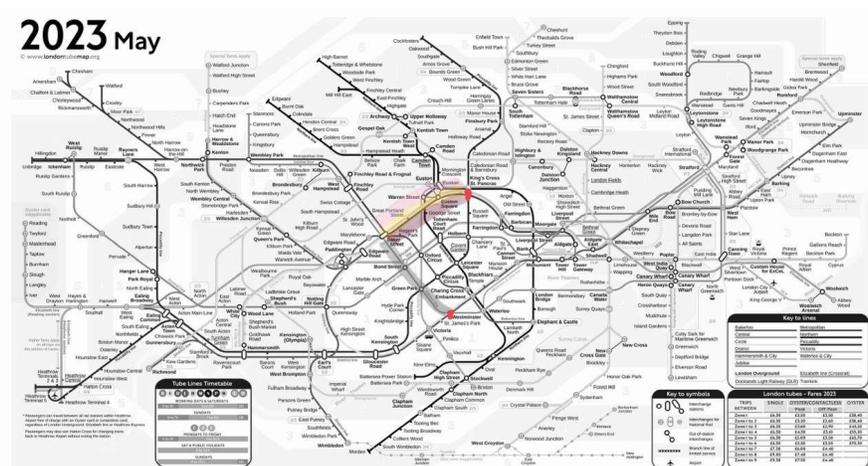


Fig. 5.10 Percorso 5L, 6L, 7L da King's Cross St. Pancras a Westminster

### Percorso 8L, 9L

Dalla stazione di King's Cross St. Pancras è possibile percorrere la linea Victoria sino alla stazione con l'omonimo nome per poi cambiare e prendere i treni diretti verso Westminster o sulla linea District (percorso 8) o sulla Circle (percorso 9). Per arrivare a destinazione sono necessari circa 17 minuti.

STAZIONI		
VICTORIA LINE	King's Cross St. Pancras	PARTENZA
	Euston	
	Warren Street	
	Oxford Circus	
	Green Park	
	Piccadilly Circus	
	Green Park	
	Victoria	CAMBIO
DISTRICT O CIRCLE LINE	St. James's Park	
	Westminster	ARRIVO

Tabella 5.13 Nodi percorso 8L, 9L da King's Cross St. Pancras a Westminster

ARCHI	
DA	A
King's Cross St. Pancras	Euston
Euston	Warren Street
Warren Street	Oxford Circus
Oxford Circus	Green Park
Green Park	Piccadilly Circus
Piccadilly Circus	Green Park
Green Park	Victoria
Victoria	St. James's Park
St. James's Park	Westminster

Tabella 5.14 Archi percorso 8L, 9L da King's Cross St. Pancras a Westminster

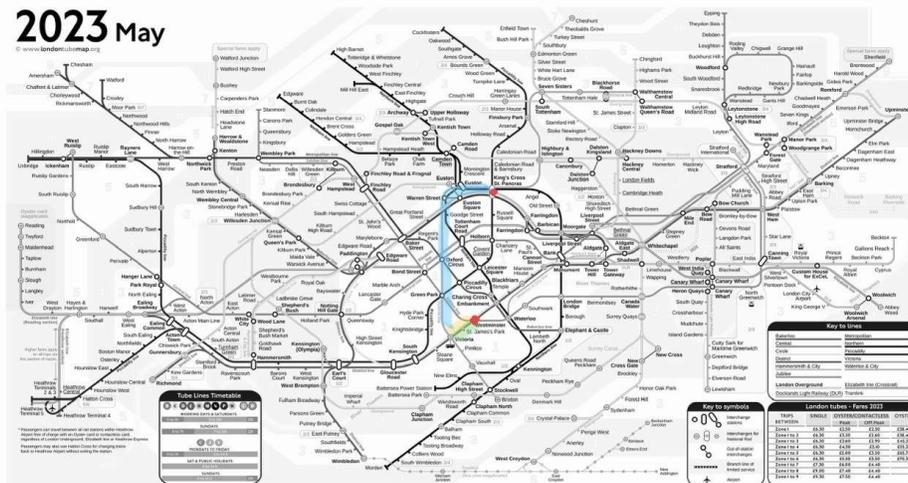


Fig. 5.11 Percorso 8L, 9L da King's Cross St. Pancras a Westminster

La metropolitana di Londra offre diversi percorsi da King's Cross St. Pancras a Westminster, ciascuno con tempi di percorrenza leggermente diversi.

	TEMPI DI PERCORRENZA
PERCORSO 1L	22 minuti
PERCORSO 2L	15 minuti
PERCORSO 3L	15 minuti
PERCORSO 4L	24 minuti
PERCORSO 5L	17 minuti
PERCORSO 6L	17 minuti
PERCORSO 7L	17 minuti
PERCORSO 8L	17 minuti
PERCORSO 9L	17 minuti

**Tabella 5.15** Tempi di percorrenza dei percorsi da King's Cross St. Pancras a Westminster

I tempi di percorrenza sono stati valutati facendo riferimento alle corse diurne tramite l'applicazione per cellulari TfL Go disponibile per Android e iOS.

Generalmente la scelta dei passeggeri ricade sul percorso più breve in termini di tempo di percorrenza, che tra quelli analizzati è quello del percorso 2L e del percorso 3L. Nonostante ciò, esistono scenari in cui i viaggiatori possono optare per percorsi alternativi a quelli più veloci: se una stazione o linea è notoriamente affollata o in ritardo, potrebbero preferire un percorso alternativo con maggiore comodità; alcuni passeggeri potrebbero avere preferenze personali riguardo alle linee o alle stazioni che preferiscono utilizzare. Inoltre, bisogna tenere conto dell'eventualità di interruzioni di servizio o della presenza di lavori in corso per ampliamento o manutenzione che costringerebbero i viaggiatori a scegliere tracciati distinti.

### 5.3.2 Metropolitana di Parigi

La metropolitana a Parigi è stata aperta in occasione dell'Expo 1900 e rappresenta la terza metropolitana più estesa in Europa Occidentale dopo quella di Londra e Madrid.



Fig.5.12 Mappa metropolitana Parigi

La rete metropolitana è lunga 226,9 km, presenta 391stazioni; questa vasta rete è composta da 16 linee:

1. *Linea 1*



Anno di inaugurazione: 1900

Ultima estensione: 1992

Lunghezza (km): 16.6

Stazioni: 25

2. *Linea 2*



Anno di inaugurazione: 1900

Ultima estensione: 1903

Lunghezza (km): 12.3

Stazioni: 25

3. *Linea 3*



Anno di inaugurazione: 1904

Ultima estensione: 1971

Lunghezza (km): 11.7

Stazioni: 25

4. *Linea 3 bis*



Anno di inaugurazione: 1971

Ultima estensione: 1911

Lunghezza (km): 1.3

Stazioni: 4

5. *Linea 4*



Anno di inaugurazione: 1908

Ultima estensione: 2022

Lunghezza (km): 14

Stazioni: 31

6. *Linea 5*



Anno di inaugurazione: 1906

Ultima estensione: 1985

Lunghezza (km): 14.6

Stazioni: 22

7. *Linea 6*



Anno di inaugurazione: 1907

Ultima estensione: 1942

Lunghezza (km): 13.7

Stazioni: 28

8. *Linea 7*



Anno di inaugurazione: 1910

Ultima estensione: 1987

Lunghezza (km): 22.5

Stazioni: 38

9. *Linea 7 bis*



Anno di inaugurazione: 1911

Ultima estensione: 1911

Lunghezza (km): 3.1

Stazioni: 8

10. *Linea 8*



Anno di inaugurazione: 1913

Ultima estensione: 2011

Lunghezza (km): 23.4

Stazioni: 38

11. *Linea 9*



Anno di inaugurazione: 1922

Ultima estensione: 1937

Lunghezza (km): 19.6

Stazioni: 37

12. *Linea 10*



Anno di inaugurazione: 1923

Ultima estensione: 1981

Lunghezza (km): 11.7

Stazioni: 23

*13. Linea 11*



Anno di inaugurazione: 1935

Ultima estensione: 1937

Lunghezza (km): 6.3

Stazioni: 13

*14. Linea 12*



Anno di inaugurazione: 1910

Ultima estensione: 2022

Lunghezza (km): 17.2

Stazioni: 31

*15. Linea 13*



Anno di inaugurazione: 1911

Ultima estensione: 2008

Lunghezza (km): 24.4

Stazioni: 32

*16. Linea 14*



Anno di inaugurazione: 1998

Ultima estensione: 2020

Lunghezza (km): 14.5

Stazioni: 13

Ogni linea della metropolitana di Parigi è divisa in sezioni protette da semafori. In caso di grande affollamento è consentita una riduzione della distanza tra i treni a poche decine di metri. Inoltre, grazie alla parziale automazione della guida delle vetture, sulle linee più affollate la distanza tra un treno e l'altro può essere ridotta fino a 90 secondi. A partire dagli anni '70, è stato installato un sistema che si occupa di regolare automaticamente la marcia dei treni, ad eccezione per le linee a basso traffico come la 10, la 3 bis e la 7 bis. Alla fine di ogni linea, è presente un calcolatore centrale basato sull'orario e sul traffico che avvisa il conducente quando avviare il treno. Le linee 14 e 1 sono linee completamente automatizzate e infatti non presentano

un macchinista a bordo; su queste due linee la guida manuale è effettuata solo in casi di emergenza.

Nella metropolitana di Parigi, la maggior parte delle linee è sotterranea, ma ci sono alcune linee che si sviluppano per alcuni tratti in superficie o su viadotti in determinate sezioni della città: linea 1, linea 2, linea3, linea 5, linea 6, linea 7, linea 9.

La manutenzione è effettuata solo nelle ore notturne e coinvolge una serie di interventi che possono essere suddivisi in operazioni leggere e complesse. Le operazioni leggere comprendono attività come la molatura dei binari, la sostituzione di componenti danneggiati per garantire la sicurezza e la pulizia della linea per mantenerla in buone condizioni. Le operazioni complesse includono interventi come il consolidamento del tunnel per rafforzare la struttura e la ristrutturazione della stazione per migliorare l'aspetto e l'efficienza. La rete metropolitana parigina presenta due sfide principali da affrontare: la vecchiaia delle infrastrutture e la presenza della falda freatica a causa della presenza del fiume Senna che attraversa la città. Per scongiurare l'arrivo di acqua, a causa di inondazioni, nei tunnel vengono installate delle pompe e vengono effettuati dei lavori di consolidamento murario per evitare crolli e cedimenti.

Così come fatto nel precedente paragrafo, si analizzeranno dei grafi passanti per le stazioni principali della metropolitana di Parigi per determinare i percorsi ottimali che i passeggeri e i turisti possono percorrere.

- *Da Gare de Paris Nord a Nation*

La stazione metropolitana Gare de Paris Nord, situata nel 10° arrondissement di Parigi, è il nodo di partenza del percorso. È una delle stazioni ferroviarie più grandi e trafficate d'Europa: da questa è possibile intraprendere sia viaggi sul territorio nazionale che su quello internazionale grazie ai treni ad alta velocità. La stazione è attraversata da due linee metropolitane, la 4 e la 5, e anche da due linee RER, la B e la D, che sono collegamenti ferroviari suburbani con varie destinazioni nelle vicinanze di Parigi.

La stazione di arrivo è Nation, nel 12° arrondissement; si tratta di un nodo importante che permette di spostarsi grazie alle varie linee (linea 1, linea 2,

linea 6, linea 9, RER A) che lo attraversano in tutta la città e di raggiungere luoghi di interesse culturale.

Successivamente si valutano i percorsi che collegano le due stazioni per determinare quello più conveniente.

Percorso 1P

Questo percorso prevede di prendere i treni della linea 4 fino alla stazione Strasbourg Saint-Denis e da questa i treni della linea 9 fino alla stazione di arrivo. Per arrivare a destinazione sono necessari circa 15 minuti.

STAZIONI		
LINEA 4	Gare de Paris Nord	PARTENZA
	Gare de Paris Est	
	Chateau d'Eau	
	Strasbourg Saint Denis	CAMBIO
LINEA 9	Republique	
	Oberkampf	
	Sainte Ambroise	
	Voltaire	
	Charonne	
	Rue des Boulets	
	Nation	

**Tabella 5.16** Nodi percorso 1P da Gare de Paris Nord a Nation

ARCHI	
DA	A
Gare de Paris Nord	Gare de Paris Est
Gare de Paris Est	Chateau d'Eau
Chateau d'Eau	Strasbourg Saint Denis
Strasbourg Saint Denis	Republique
Republique	Oberkampf
Oberkampf	Sainte Ambroise
Sainte Ambroise	Voltaire
Voltaire	Charonne
Charonne	Rue des Boulets
Rue des Boulets	Nation

**Tabella 5.17** Archi percorso 1P da Gare de Paris Nord a Nation

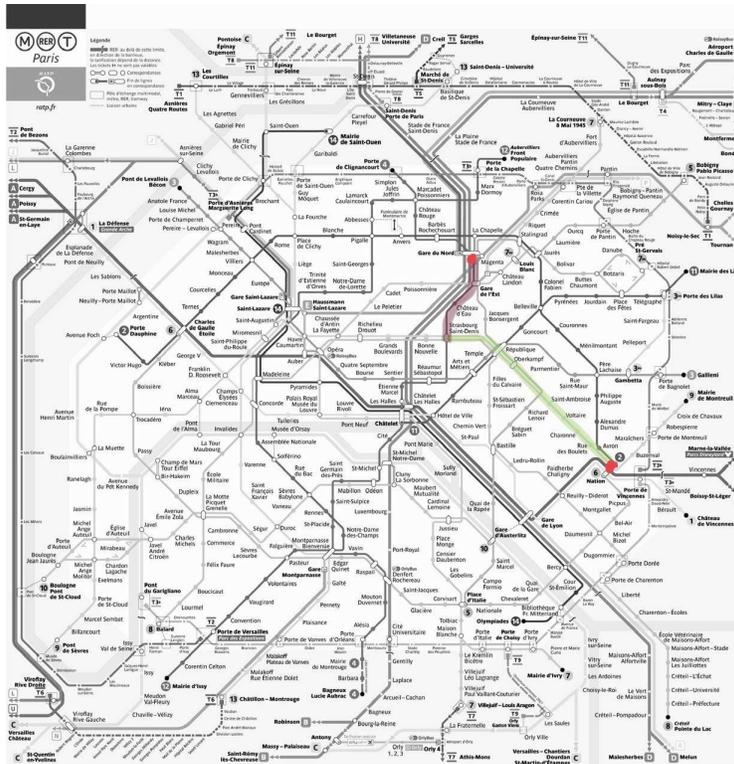


Fig. 5.13 Percorso 1P da Gare de Paris Nord a Nation

Percorso 2P

Dalla stazione Gare de Paris Nord si arriva a Nation utilizzando prima la linea 5 e la linea 9 dalla stazione di scambio metropolitano Oberkampf. Per arrivare a destinazione sono necessari circa 16 minuti.

STAZIONI		
LINEA 5	Gare de Paris Nord	PARTENZA
	Gare de Paris Est	
	Jacques Bonsergent	
	Republique	
LINEA 9	Oberkampf	CAMBIO
	Sainte Ambroise	
	Voltaire	
	Charonne	
	Rue des Boulets	
	Nation	ARRIVO

Tabella 5.18 Nodi percorso 2P da Gare de Paris Nord a Nation

ARCHI	
DA	A
Gare de Paris Nord	Gare de Paris Est
Gare de Paris Est	Jacques Bonsergent
Jacques Bonsergent	Republique
Republique	Oberkampf
Oberkampf	Sainte Ambroise
Sainte Ambroise	Voltaire
Voltaire	Charonne
Charonne	Rue des Boulets
Rue des Boulets	Nation

Tabella 5.19 Archi percorso 2P da Gare de Paris Nord a Nation

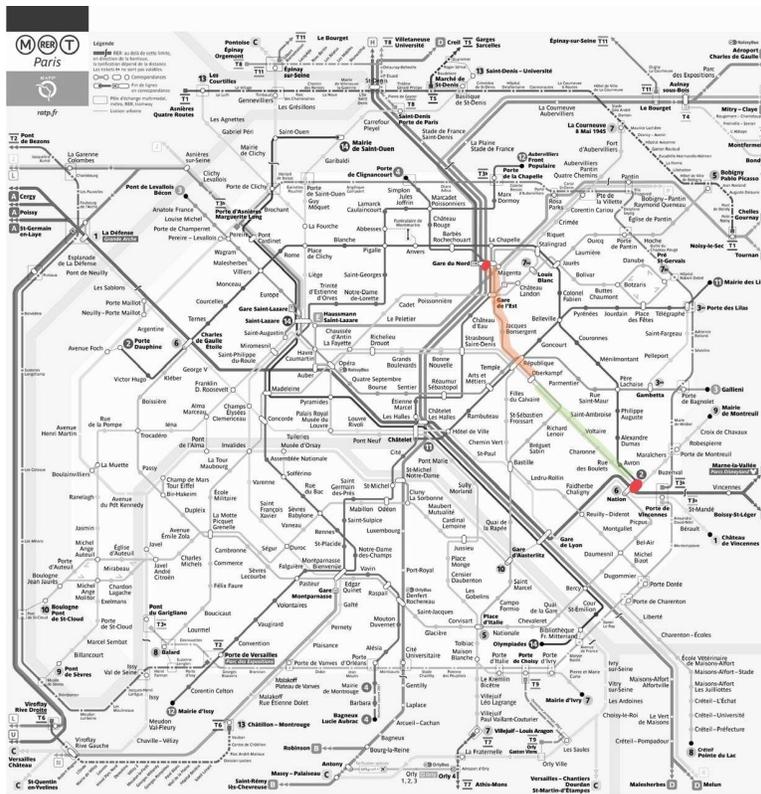


Fig. 5.14 Percorso 2P da Gare de Paris Nord a Nation

### Percorso 3P

Percorrendo 7 fermate della linea 4 da Gare de Paris Nord si giunge a Chatalet dove sarà necessario spostarsi sulla linea 1 per arrivare a destinazione. Per arrivare a destinazione sono necessari circa 22 minuti.

STAZIONI		
LINEA 4	Gare de Paris Nord	PARTENZA
	Gare de Paris Est	
	Chateau d'Eau	
	Strasbourg Saint Denise	
	Reuamur - Sebastopol	
	Etienne Marcel	
	Les Halles	
	Chatelet	CAMBIO
LINEA 1	Hotel de Ville	ARRIVO
	Saint Paul	
	Bastille	
	Reuilly - Diderot	
	Nation	

**Tabella 5.20** Nodi percorso 3P da Gare de Paris Nord a Nation

ARCHI	
DA	A
Gare de Paris Nord	Gare de Paris Est
Gare de Paris Est	Chateau d'Eau
Chateau d'Eau	Strasbourg Saint Denise
Strasbourg Saint Denise	Reuamur - Sebastopol
Reuamur - Sebastopol	Etienne Marcel
Etienne Marcel	Les Halles
Les Halles	Chatelet
Chatelet	Hotel de Ville
Hotel de Ville	Saint Paul
Saint Paul	Bastille
Bastille	Reuilly - Diderot
Reuilly - Diderot	Nation

**Tabella 5.21** Archi percorso 3P da Gare de Paris Nord a Nation

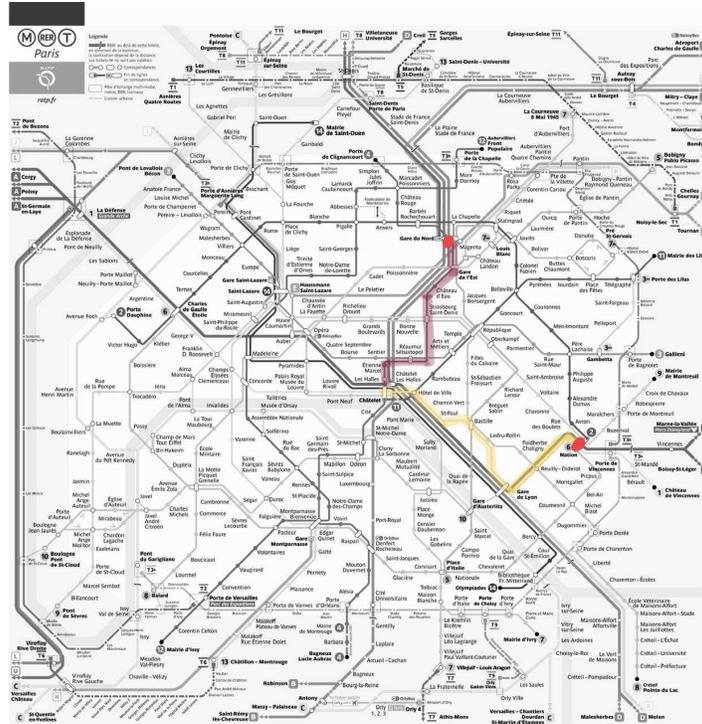


Fig. 5.15 Percorso 3P da Gare de Paris Nord a Nation

Percorso 4P

Da Gare de Paris Nord si utilizzano le prime 7 fermate della linea 5 sino a Bastille e da qui si utilizzano i treni della linea 1 fino Nation. Per arrivare a destinazione sono necessari circa 20 minuti.

STAZIONI		
LINEA 5	Gare de Paris Nord	PARTENZA
	Gare de Paris Est	
	Jacques Bonsergent	
	Republique	
	Oberkampf	
	Richard Lenoir	
	Breguet - Sabin	
LINEA 1	Bastille	CAMBIO
	Gare de Lyon	
	Reuilly - Diderot	
	Nation	ARRIVO

Tabella 5.22 Nodi percorso 4P da Gare de Paris Nord a Nation

ARCHI	
DA	A
Gare de Paris Nord	Gare de Paris Est
Gare de Paris Est	Jacques Bonsergent
Jacques Bonsergent	Republique
Republique	Oberkampf
Oberkampf	Richard Lenoir
Richard Lenoir	Breguet - Sabin
Breguet - Sabin	Bastille
Bastille	Gare de Lyon
Gare de Lyon	Reuilly - Diderot
Reuilly - Diderot	Nation

Tabella 5.23 Archi percorso 4P da Gare de Paris Nord a Nation

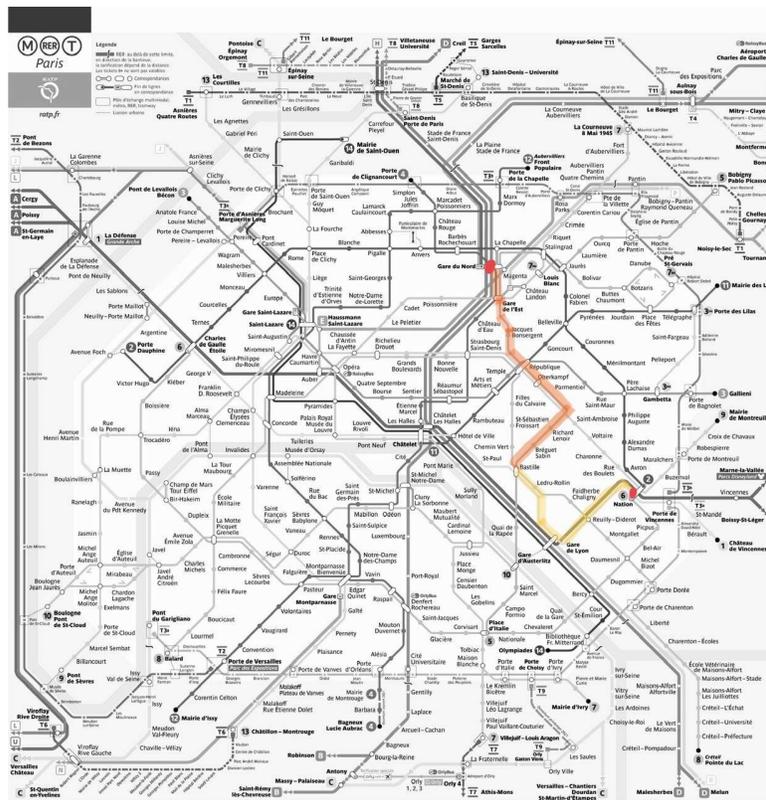


Fig. 5.16 Percorso 4P da Gare de Paris Nord a Nation

Si riporta di seguito la Tabella 5.24 che riassume i tempi di percorrenza dei percorsi da Gare de Paris Nord a Nation.

	TEMPI DI PERCORRENZA
PERCORSO 1P	15 minuti
PERCORSO 2P	16 minuti
PERCORSO 3P	22 minuti
PERCORSO 4P	20 minuti

**Tabella 5.24** Tempi di percorrenza percorsi da Gare de Paris Nord a Nation

Si sottolinea che i tempi di percorrenza sono stati valutati facendo riferimento alle corse diurne tramite il sito ratp.fr.

Il percorso migliore in termini di tempo di percorrenza è il Percorso 1P, che richiede circa 15 minuti: è il percorso più veloce per raggiungere Nation da Gare de Paris Nord. Gli scenari per i quali i passeggeri prediligono percorsi differenti sono gli stessi per ogni rete metropolitana e riguardano gli affollamenti e i ritardi, le preferenze personali e le interruzioni per lavori.

#### **5.4 Confronto e Analogie tra Metropolitane e Formicai**

Le linee metropolitane di Londra e Parigi e i formicai rappresentano due tipologie di sistemi di tunnel sotterranei con scopi e caratteristiche molto diverse. Nonostante le differenze evidenti, esistono alcune affinità interessanti nella loro topologia.

La rete ramificata di tunnel interconnessi rappresenta un elemento fondamentale sia per le linee metropolitane di Londra e Parigi che per i formicai. L'estensione costituisce a tutti gli effetti un aspetto cruciale per garantire un accesso efficiente e una connettività ottimale. La presenza di una vasta rete nelle metropolitane rende possibile ai passeggeri di spostarsi facilmente, all'interno della città e nella sua periferia, riducendo i tempi di percorrenza dei mezzi su ruote e ciò comporta la mitigazione del traffico nelle strade. La struttura ingarbugliata dei formicai presenta una serie di scopi fondamentali per la sopravvivenza della colonia. Ogni zona del formicaio ha compiti fondamentali: nelle camere viene stoccato il cibo, vengono deposte e curate le larve, vengono depositati i rifiuti; i tunnel presenti nel nido consentono alle formiche di muoversi in maniera ottimale da una camera

all'altra e dall'interno verso l'esterno e viceversa, forniscono protezione dai predatori e dalle minacce e permettono la ventilazione.

Sia nei formicai che nelle metropolitane sono presenti punti chiave: nei primi ci sono le camere differenziate tra loro in base alle attività; nelle seconde le stazioni di partenza, intercambio e arrivo. Entrambi i sistemi sono colmi di bivi e intersezioni. Nel contesto delle metropolitane, le intersezioni multiple delle linee avvengono nelle stazioni principali, spesso indicate come hub di trasferimento: queste stazioni sono punti chiave in cui i passeggeri possono scendere da una linea e trasferirsi agevolmente a un'altra. I tunnel ingarbugliati permettono agli insetti di spostarsi attraverso questi per raggiungere le diverse camere del nido in cui sono svolte le varie mansioni. In entrambi i casi è possibile notare come la struttura offra vantaggi legati all'accessibilità: nel caso delle metropolitane si traduce nella realizzazione di un trasporto pubblico affidabile, nel caso dei formicai, invece, in una gestione ottimale delle attività.

Una somiglianza sorprendente è la presenza di una struttura gerarchica in entrambi i casi che consente di mantenere l'ordine e l'efficienza nelle operazioni. Nel caso dei formicai, la regina rappresenta il vertice della gerarchia: il suo compito principale è quello di deporre le uova, garantendo così la riproduzione della colonia; le formiche operaie, invece, svolgono una vasta gamma di compiti, che possono includere la ricerca di cibo, la cura delle larve, la costruzione e la manutenzione del formicaio e la difesa del territorio. Nelle metropolitane, c'è una gestione centralizzata che coordina il funzionamento di tutte le linee e le stazioni e infatti le decisioni prese a livello centrale influenzano l'intera rete. Tuttavia, va notato che, mentre nei formicai la gerarchia è basata sulla biologia e sulle funzioni specifiche delle formiche, nelle metropolitane è il risultato di un sistema di gestione umano progettato per garantire il funzionamento ottimale delle infrastrutture.

Inoltre, va sottolineato che entrambi i sistemi richiedono un'attenta pianificazione e manutenzione dei tunnel per garantire che la rete rimanga operativa nel tempo. Nel caso delle metropolitane, la pianificazione dei tunnel coinvolge la progettazione e la costruzione di reti atte a garantire che le linee siano in grado di coprire le diverse parti della città, collegando le aree abitate e i punti di interesse. In fase di progettazione deve essere prevista la capacità

di espansione per far fronte all'aumento della domanda dei passeggeri nel tempo. La manutenzione deve essere effettuata sugli impianti elettrici, sui binari e sui sensori e anche a livello strutturale. Nei formicai, la pianificazione e la costruzione dei tunnel sono condotte dalle formiche operaie durante la creazione e la crescita della colonia. La manutenzione dei tunnel è altrettanto importante, poiché garantisce che il formicaio rimanga sicuro, ben ventilato e funzionale: rimuovendo i detriti gli insetti regolano il flusso di aria all'interno del nido.

## 6 Conclusioni

---

Questa tesi ha esplorato l'applicazione dell'approccio biomimetico nell'ambito dell'ingegneria civile, con un focus specifico sull'analisi dei formicai come fonte di ispirazione poiché le colonie di formiche riescono a realizzare strutture complesse che resistono a carichi significativi e a adattarsi all'ambiente circostante. Durante la ricerca, sono stati esaminati i principi di progettazione e costruzione dei formicai, valutando la geometria, la distribuzione delle camere, i collegamenti e i materiali utilizzati. È emerso che i principi di ingegneria che guidano il processo di costruzione dei nidi delle formiche possono essere applicati con successo per ottimizzare i processi di scavo e migliorare le prestazioni dei tunnel sotterranei.

È stato realizzato un approfondimento sui metodi di scavo utilizzati nella costruzione delle gallerie valutando le tecniche e i macchinari per l'escavazione, i materiali, la ventilazione, il meccanismo di rottura del fronte del tunnel e i tempi necessari di realizzazione. La valutazione ha preso in considerazione le due metodologie di scavo: meccanizzate o convenzionale. Le TBM e le MTM sono i macchinari che hanno rivoluzionato gli scavi sotterranei riducendo la possibilità di cedimenti, come quello del fronte scavo analizzato, e le tempistiche di realizzazione. Il processo di scavo risulta essere simile a quello adottato dalle formiche: il materiale viene prelevato dal fronte scavo e spostato verso l'esterno e allo stesso tempo si stabilizza il tunnel scavato. L'utilizzo di materiali ottimali e la realizzazione di un sistema di ventilazione efficiente risultano essere fondamentali per garantire la sicurezza e la durabilità nel tempo dell'infrastruttura e del formicaio.

Nel caso delle metropolitane, è emerso come la pianificazione delle varie fasi sia essenziale per gestire le risorse e rispettare i tempi di consegna; gli imprevisti dilungano i tempi di realizzazione e fanno aumentare i costi. La pianificazione accurata e la costante manutenzione rappresentano i cardini per il funzionamento ottimale sia delle metropolitane che dei formicai nel corso del tempo. La pianificazione non riguarda solo la progettazione iniziale della rete, ma deve anche prevedere la capacità di adattarsi alle esigenze in evoluzione delle città nel corso degli anni. Questo significa che i progettisti

devono tenere conto della crescita urbana, dei cambiamenti demografici e delle tendenze di mobilità, pianificando estensioni e aggiornamenti delle linee in modo da garantire un servizio efficiente. In entrambi i casi, la manutenzione è fondamentale per prevenire l'usura, l'invecchiamento e i guasti delle strutture.

L'applicazione della teoria dei grafi si è rivelata fondamentale per valutare l'efficienza dei due sistemi. Nel caso dei formicai questo tipo di analisi ha permesso di individuare le camere di passaggio e di intersezione che permettono alle formiche di ottimizzare le operazioni. Analogamente, l'applicazione alla rete metropolitana della teoria dei grafi è preziosa per poter individuare i nodi critici che sono le stazioni di scambio e i percorsi che ottimizzano gli spostamenti; le stazioni devono essere ampie e funzionali per agevolare il trasferimento dei passeggeri. L'impiego di algoritmi basati sui grafi consente di ottimizzare i trasporti riducendo i tempi di spostamento. Definite due stazioni principali per ogni sistema di trasporto metropolitano di Londra e Parigi, sono stati ipotizzati i vari percorsi possibili che potrebbero essere effettuati tra le stazioni. Ogni percorso prevede l'utilizzo di una o più linee e ciò comporta tempi di percorrenza differenti. Ciascun passeggero è propenso a intraprendere il percorso più breve ma la scelta può virare su altri tracciati che permettono di massimizzare i comfort e l'esperienza di viaggio. Abbattendo i tempi di percorrenza i passeggeri preferiranno utilizzare i mezzi pubblici per i loro spostamenti e ciò comporta una diminuzione dell'uso dei carburanti e delle emissioni inquinanti associate, promuovendo la sostenibilità ambientale. Difatti, la diminuzione dell'uso dei veicoli privati riduce l'inquinamento atmosferico locale, migliorando la qualità dell'aria nelle città con benefici diretti sulla salute pubblica. Conducendo delle analisi sulla densità dei passeggeri è possibile ottimizzare il sistema di trasporto adattando il servizio di metropolitana alle variazioni della domanda: si possono apportare modifiche agli orari o alle frequenze dei treni. La valutazione sulla densità deve essere effettuata in maniera costante per valutare il sovraffollamento che, oltre a compromettere la sicurezza dei passeggeri, è una delle principali cause di incidenti. Diventa necessario quindi introdurre sensori di ultima generazione per gestire i passeggeri e il traffico e che inviino informazioni in tempo reale per permettere di scegliere

il percorso che apporta maggiori comfort agli utenti. I sensori devono comunicare in tempo reale con la stazione di controllo in modo tale che sia possibile aumentare o diminuire in base alla richiesta il numero di mezzi che percorre quella determinata linea. Nelle varie stazioni devono essere inseriti pannelli con aggiornamenti immediati dei tempi di attesa e dei ritardi di ciascuna linea in modo tale che i viaggiatori possano decidere se aspettare l'arrivo del treno o cambiare percorso spostandosi su un'altra tratta.

L'applicazione della teoria dei grafi permette anche di studiare gli ampliamenti strutturali dei sistemi dovuti a un aumento di domanda dovuto, per i formicai, alla crescita della colonia, e, per la metropolitana, alla crescita demografica e alla sostenibilità ambientale. È quindi possibile individuare quelli che sono i punti in cui è necessario introdurre i nuovi nodi dei grafi che solitamente combaciano con le nuove aree di sviluppo urbano o aree in cui è presente una evidente mancanza di servizi di trasporto pubblico.

A livello di progettazione è opportuno realizzare delle modifiche per migliorare la struttura e l'organizzazione della rete metropolitana. Molte stazioni sono state progettate circa un secolo fa quando non era presente una consapevolezza diffusa sull'accessibilità per le persone con disabilità o semplicemente per anziani e bambini, perciò, spesso sono caratterizzate dalla presenza di barriere architettoniche. È necessario quindi effettuare una valutazione delle stazioni metropolitane esistenti per cercare di introdurre i requisiti necessari, anche laddove gli spazi risultano essere ristretti, per renderle accessibili a tutti e progettare le nuove in modo tale che garantiscano accessibilità totale sin dall'inizio. Tra le barriere più evidenti si pone la mancanza di ascensori o scale mobili specialmente nelle stazioni più antiche; l'altezza più alta o più bassa delle banchine rispetto al pavimento del treno; la mancanza di segnalazioni tattili, annunci visivi e sottotitoli per i passeggeri con disabilità visive e uditive; la mancanza di sedute. La rete deve essere realizzata con particolare attenzione all'efficienza energetica: deve essere progettato l'isolamento termico, i sistemi di raffreddamento e riscaldamento e l'utilizzo di materiali a basso consumo. L'implementazione di sistemi avanzati di gestione energetica permette di tagliare gli sprechi delle risorse: per garantire ciò è necessario estendere a tutte le linee i sistemi a trazione elettrica, adottare fonti di energia rinnovabile come eolica o solare, illuminare

tramite luci a consumo ridotto come quelle a LED, isolare in maniera termica le stazioni per ridurre le perdite di calore in inverno e il riscaldamento delle stazioni e dei tunnel nei periodi estivi. Migliorare la sicurezza nelle metropolitane è una priorità per garantire ai passeggeri spostamenti senza rischi e pericoli. Oltre ad aumentare le telecamere del sistema di videosorveglianza, implementare i sistemi di allarme e formare in maniera adeguata il personale è opportuno rendere ciascuna linea automatica. La presenza di linee automatiche riduce la possibilità di incidenti poiché i treni sono gestiti tramite sensori che riducono gli errori umani come errori di guida o di comunicazione. L'utilizzo di mezzi automatici permette di variare il numero di treni attivi sulle varie linee in base alla domanda poiché questi si spostano lungo i binari senza la presenza di macchinisti. Il sistema automatico è costituito da divisori con aperture che si allineano a quelle dei treni; i divisori separano la banchina dai binari e impediscono l'accesso a questi fino a quando il treno non è completamente fermo. Nel settore delle infrastrutture sotterranee, l'uso di materiali innovativi può rivoluzionare la progettazione poiché questi materiali offrono numerosi vantaggi che vanno dalla resistenza alla sostenibilità del materiale. I materiali che possono essere introdotti sono: le fibre di carbonio per il rinforzo strutturale, il calcestruzzo a prestazioni elevate per la resistenza a condizioni estreme e allo stress meccanico, i materiali compositi con elementi naturali come gomma o fibre per ridurre il peso strutturale, i materiali fotocatalitici per purificare l'aria e i materiali riciclati.

In definitiva, le innovazioni e le migliorie nel campo delle infrastrutture sotterranee, ispirate alla biomimetica e agli studi sul comportamento delle formiche, convergono verso un obiettivo centrale: la realizzazione di strutture sostenibili e poco inquinanti che rispettino l'ambiente circostante e che garantiscano sicurezza ai passeggeri.

## 7 Bibliografia

---

- [1] Yang, G.; Zhou,W.; Qu,W.; Yao,W.; Zhu, P.; Xu, J. - *A Review of Ant Nests and Their Implications for Architecture* - Buildings 2022, 12, 2225
- [2] J. David Frost, M. Mahdi Roozbahani, Kendra Jackson, Lindsay Leonard, Karie Yamamoto, Mykala Jones - *Biologically-inspired insights into soil arching and tunnel stability from the topology of ant nests* - Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017
- [3] *The Origin of Nest Complexity in Social Insects* - ©1998 John Wiley & Sons, Inc., Vol.3, No.6
- [4] Luiz Carlos Forti, Aldenise Alves Moreira, Roberto da Silva Camargo, Nadia Caldatoa, Maria Aparecida Castellani - *Nest architecture development of grass-cutting ants* - © 2017 Sociedade Brasileira de Entomologia. Published by Elsevier Editora Ltda
- [5] Marcio R. Pie, Rebeca B. Rosengaus, James F.A. Traniello - *Nest architecture, activity pattern, worker density and the dynamics of disease transmission in social insects* - Journal of Theoretical Biology 226 (2004) 45–51
- [6] S. S. Verza, R. C. R. G. Gervásio, O. M. Alves e Silva, M. O. Gomes, S. A. Souza, R. M. Mussury - *Nest structure engineering of the leaf-cutting ant, *Acromyrmex landolti*, in the semiarid Caatinga biome* - © International Union for the Study of Social Insects (IUSI) 2019
- [7] S. Thomas Ng and Yanshuai Zhang - *Optimizing Construction Time and Cost Using Ant Colony Optimization Approach* - JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT © ASCE / SEPTEMBER 2008 / 721
- [8] MARTIN BOLLAZZI & FLAVIO ROCES - *To build or not to build: circulating dry air organizes collective building for climate control in the leaf-cutting ant *Acromyrmex ambiguus** - 2007 The Association for the Study of Animal Behaviour
- [9] A. A. Moreira, L. C. Forti, M. A. C. Boaretto, A. P. P. Andrade, J. F. S. Lopes and V. M. Ramos - *External and internal structure of *Atta bisphaerica**

- Forel (Hymenoptera: Formicidae) nests* - J. Appl. Ent. 128, 204–211 (2004),  
© 2004 Blackwell Verlag, Berlin
- [10] A.S. Mikheyev and W.R. Tschinkel - *Nest architecture of the ant Formica pallidefulva: structure, costs and rules of excavation* - Insect. Soc. 51 (2004) 30–36
- [11] D. Nicolas Espinoza and J. Carlos Santamarina - *Ant tunneling—a granular media perspective* - Received: 1 July 2009 © Springer-Verlag 2010
- [12] Zhou Wei, Qu Wenjun, Zhang Zhi – *The preliminary exploration of underground ant nests materials and structure* - Building on Our Growth Opportunities Miser sur nos opportunités de croissance
- [13] F. Huang , X.L. Yang - *Upper bound limit analysis of collapse shape for circular tunnel subjected to pore pressure based on the Hoek–Brown failure criterion* - © 2011 Elsevier Ltd
- [14] Salvador Senent, Rafael Jimenez - *A tunnel face failure mechanism for layered ground, considering the possibility of partial collapse* - © 2015 Elsevier Ltd
- [15] M. Fraldi , F. Guarracino - *Evaluation of impending collapse in circular tunnels by analytical and numerical approaches* - © 2011 Elsevier Ltd
- [16] M. Fraldi, F.Guarracino - *Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek–Brown failure criterion* - © 2008 Elsevier Ltd
- [17] G. S. Crighton, DSc(Hon), BSc, FICE. A. R. Biggart, BSc, FEng, FICE, and  
E. H. Norie, MA, FICE - *Tunnel design and construction* - Proc. Instn Civ. Engrs, Ciu. Engng, Channel Tunnel, Part 1 : Tunnels 1992,18-42
- [18] Wen Sun & Qingguo Liang & Suhua Qin & Yongxin Yuan & Tangjie Zhang - *Evaluation of groundwater effects on tunnel engineering in loess* - © Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 202
- [19] Zhongkai Huang, Dongmei Zhang, Kyriazis Pitilakis, Grigorios Tsinidis, Hongwei Huang, Dongming Zhang, Sotirios Argyroudis - *Resilience assessment of tunnels: Framework and application for tunnels in alluvial deposits exposed to seismic hazard* - Soil Dynamics and Earthquake Engineering 162 (2022) 107456

- [20] Robert Buarque de Macedo , Edward Andò , Shilpa Joy , Gioacchino Viggiani, Raj Kumar Pal, Joseph Parker , and José E. Andrade - Unearthing real-time 3D ant tunneling mechanics - PNAS 2021 Vol. 118 No. 36 e2102267118
- [21] Zhanping Song, Guilin Shi, Baoyun Zhao, Keming Zhao and Junbao Wang - *Study of the stability of tunnel construction based on double-heading advance construction method* - Advances in Mechanical Engineering 2020, Vol. 12(1) 1–17
- [22] Wei Gao - *Comparison study on nature-inspired optimization algorithms for optimization back analysis of underground engineering* - © Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature 2020
- [23] Giacomo Chiesa, Roberto Pagani, Jean-Marc Tulliani - *Biomimetica e architettura 'Come la natura domina la tecnologia'* – FRANCOANGELI
- [24] Baldissara M. - *Biomimetica degli spazi. Sperimentazioni digitali di processi biologici in architettura* - Tesi di Dottorato di ricerca in Teorie e Progetto, Dipartimento di Architettura e Progetto della Sapienza di Roma, 2018
- [25] Luz G.M., Mano J.F. - *Biomimetic design of materials and biomaterials inspired by structure of nacre* - Philosophical Transactions of the Royal Society A: mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2009
- [26] Stephen LAW, Alain CHIARADIA, Christian SCHWANDER - *TOWARDS A MULTI-MODAL SPACE SYNTAX ANALYSIS. A case study of the London street and underground network* - Eighth International Space Syntax Symposium Santiago de Chile: PUC, 2012
- [27] Rocha Rangel, Enrique; Rodríguez García, José Amparo; Martínez Peña, Enrique; López Hernández, Juan - *Biomimética: innovación sustentable inspirada por la naturaleza* - Investigación y Ciencia, vol. 20, núm. 55, mayo-agosto, 2012, pp. 56-61
- [28] Lucia Pietroni, Jacopo Mascitti – *I materiali bioispirati per un design sostenibile e rigenerativo* - MD Journal [ 1 ] 2016

- [29] Mostafa Mohammed Abd Elhafeez, Ashraf Abd Elfattah Elmokadem - *Biomimicry Levels as an Approach to the Architectural Sustainability* - PORT SAID ENGINEERING RESEARCH JOURNAL
- [30] Nariman Gamal Lotfi – *Nature inspired design processes: The adaption of various principles of biology as the base for a Holistic Approach towards a new strategy within the design process* - Faculty of Postgraduate Studies and Scientific Research, German University in Cairo
- [31] Lucia Pietroni – *Bio-Inspired Design. La biomimesi come promettente prospettiva di ricerca per un design sostenibile* – Scienza & Ricerche, n.4-febbraio 2015
- [32] Peila Daniele - *Indagini preliminari nella costruzione di gallerie: analisi della letteratura tecnica* - PORTO Publications Open Repository Torino
- [33] Massimo Chiarelli - *Tecniche avanzate di scavo in sotterraneo mediante TBM, Microtunnelling e Horizontal Directional Drilling* – ingenio sistema integrato di informazione per l'ingegneria
- [34] Massimo Chiarelli - *Metodo di scavo convenzionale: il drill & blast nella costruzione di tunnel* – ingenio sistema integrato di informazione per l'ingegneria
- [35] Bringiotti M. - *L'armatura delle rocce mediante gli innovativi ancoraggi meccanici* – Geotunnel
- [36] César Porrás-Amoresa, Fernando R. Mazarrón, Ignacio Cañas, Paola Villoría Sáez - *Natural ventilation analysis in an underground construction: CFD simulation and experimental validation* - Tunnelling and Underground Space Technology, journal homepage: [www.elsevier.com/locate/tust](http://www.elsevier.com/locate/tust)
- [37] Chrysothemis Paraskevopoulou, Georgios Boutsis - *Cost Overruns in Tunnelling Projects: Investigating the Impact of Geological and Geotechnical Uncertainty Using Case Studies* - Infrastructures 2020, 5, 73
- [38] Giorgio Poletti – *Grafi e strutture*

## 8 Sitografia

---

[https://it.wikipedia.org/wiki/Stadio\\_nazionale\\_di\\_Pechino](https://it.wikipedia.org/wiki/Stadio_nazionale_di_Pechino)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Beijing\\_National\\_Aquatics\\_Centre](https://en.wikipedia.org/wiki/Beijing_National_Aquatics_Centre)

[https://it.wikipedia.org/wiki/Pannello\\_a\\_sandwich](https://it.wikipedia.org/wiki/Pannello_a_sandwich)

<https://tunnelpro.it/it/doppio-scudo-tbm>

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/20141120\\_gotthard-basistunnel02-wikipedia-hannes-ortlieb.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/20141120_gotthard-basistunnel02-wikipedia-hannes-ortlieb.jpg)

<http://www.salesfactory.it/progetto-preliminare-progetto-definitivo-e-progetto-esecutivo/>

<https://www.directindustry.it/prod/sandvik-mining-and-rock-technology/product-40142-642810.html>

<https://ugitec.co.jp/en/products/largest/>

<https://beltps.com/it/microtunneling/>

<https://www.cptechology.it/robot-posacentine/>

<https://www.cancellotti.com/prodotti/conci-prefabbricati/conci-per-gallerie/>

<https://www.stradeautostrade.it/ferrovie-e-metropolitane/prevenzione-incendi-in-gallerie-metropolitane/>

[https://es.123rf.com/photo\\_84909709\\_construcci%C3%B3n-del-t%C3%B3nel-subterr%C3%A1neo-del-metro-tubo-de-ventilaci%C3%B3n-temporal-grande.html](https://es.123rf.com/photo_84909709_construcci%C3%B3n-del-t%C3%B3nel-subterr%C3%A1neo-del-metro-tubo-de-ventilaci%C3%B3n-temporal-grande.html)

[https://it.wikipedia.org/wiki/Metropolitana\\_di\\_Londra](https://it.wikipedia.org/wiki/Metropolitana_di_Londra)

[https://blogsmedia.lse.ac.uk/blogs.dir/43/files/2019/03/underground-signs-1768736\\_1920.jpg](https://blogsmedia.lse.ac.uk/blogs.dir/43/files/2019/03/underground-signs-1768736_1920.jpg)

<https://www.londontubemap.org/maps/London-tube-map-2023.png>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Metropolitana\\_di\\_Parigi](https://it.wikipedia.org/wiki/Metropolitana_di_Parigi)

<https://www.museidiparigi.it/mappa-metro-parigi/>

## 9 Indice delle figure

---

<b>Fig. 2.1</b> Spirale di progettazione biomimetica.....	7
<b>Fig. 2.2</b> Stadio Nazionale di Pechino.....	8
<b>Fig. 2.3</b> Dettaglio stadio Nazionale di Pechino.....	9
<b>Fig. 2.4</b> Beijing National Aquatics Centre.....	9
<b>Fig. 2.5</b> Struttura per la raccolta della nebbia ispirata a un coleottero.....	10
<b>Fig. 2.6</b> Pannello di isolamento sandwich.....	10
<b>Fig. 2.7</b> Mattone forato.....	11
<b>Fig. 2.8</b> Disegno esplicativo TBM.....	11
<b>Fig. 3.1</b> Rappresentazione di un formicaio.....	17
<b>Fig. 3.2</b> Dettaglio architettura interna del formicaio dopo lo scavo del terreno circostante.....	18
<b>Fig. 3.3</b> Vista dall'alto di un calco di gesso di un tunnel (A) e della camera (B).....	20
<b>Fig. 3.4</b> Caratteristiche geometriche.....	23
<b>Fig. 3.5</b> Meccanismi geo-meccanici: numero di coordinazione.....	24
<b>Fig. 3.6</b> Analisi strategie di rimozione al variare di $M/d$ e del contenuto di acqua $S\%$ .....	25
<b>Fig. 3.7</b> Forza di trazione richiesta per rimuovere la particella di dimensione $d$ .....	26
<b>Fig. 3.8</b> Forze intercapillari al variare del diametro delle particelle di terreno.....	27
<b>Fig. 4.1</b> Galleria sotterranea.....	30
<b>Fig. 4.2</b> Macchina perforatrice.....	33
<b>Fig. 4.3</b> Posizionamento esplosivi nei fori.....	34
<b>Fig. 4.4</b> Esplosione per scavo.....	34
<b>Fig. 4.5</b> Ciclo di scavo metodo Drill & Blast.....	35
<b>Fig. 4.6</b> TBM con dimensioni più grande al mondo ( $\varnothing 17.45\text{m}$ ).....	36
<b>Fig. 4.7</b> Microtunneling MTM.....	38
<b>Fig. 4.8</b> Installazione dei bulloni sulla volta del tunnel.....	39
<b>Fig. 4.9</b> Posizionamento e regolazione delle centine tramite bracci telescopici .....	40

<b>Fig. 4.10</b>	Anello formato da conci in calcestruzzo armato prefabbricato....	41
<b>Fig. 4.11</b>	Tunnel realizzato con TBM ed elementi prefabbricati.....	41
<b>Fig. 4.12</b>	Blocco roccioso in crollo.....	44
<b>Fig. 4.13</b>	Cerchio di Mohr.....	45
<b>Fig. 4.14</b>	Schema di collasso.....	46
<b>Fig. 4.15</b>	Ventilatori in galleria.....	54
<b>Fig. 4.16</b>	Tubo di aspirazione.....	55
<b>Fig. 5.1</b>	Schema del problema matematico dei ponti di Königsberg.....	59
<b>Fig. 5.2</b>	Rappresentazione grafica delle interazioni sociali nel formicaio con un grafo.....	60
<b>Fig. 5.3</b>	Rappresentazione grafica dell'organizzazione strutturale del formicaio .....	62
<b>Fig. 5.4</b>	Mappa della metropolitana di Londra.....	63
<b>Fig. 5.5</b>	Percorso da Heathrow a Canary Wharf.....	69
<b>Fig. 5.6</b>	Percorso 1L da King's Cross St. Pancras a Westminster.....	71
<b>Fig. 5.7</b>	Percorso 2L da King's Cross St. Pancras a Westminster.....	72
<b>Fig. 5.8</b>	Percorso 3L da King's Cross St. Pancras a Westminster.....	73
<b>Fig. 5.9</b>	Percorso 4L da King's Cross St. Pancras a Westminster.....	74
<b>Fig. 5.10</b>	Percorso 5L, 6L, 7L da King's Cross St. Pancras a Westminster...	75
<b>Fig. 5.11</b>	Percorso 8L, 9L da King's Cross St. Pancras a Westminster.....	76
<b>Fig. 5.12</b>	Mappa metropolitana Parigi .....	78
<b>Fig. 5.13</b>	Percorso 1P da Gare de Paris Nord a Nation.....	84
<b>Fig. 5.14</b>	Percorso 2P da Gare de Paris Nord a Nation.....	85
<b>Fig. 5.15</b>	Percorso 3P da Gare de Paris Nord a Nation.....	87
<b>Fig. 5.16</b>	Percorso 4P da Gare de Paris Nord a Nation.....	88

## 10 Indice tabelle

---

<b>Tabella 5.1</b> Nodi metropolitana da Heathrow a Canary Wharf.....	67
<b>Tabella 5.2</b> Archi percorso da Heathrow a Canary Wharf.....	68
<b>Tabella 5.3</b> Nodi percorso 1L da King's Cross St. Pancras a Westminster..	70
<b>Tabella 5.4</b> Archi percorso 1L da King's Cross St. Pancras a Westminster..	70
<b>Tabella 5.5</b> Nodi percorso 2L da King's Cross St. Pancras a Westminster..	71
<b>Tabella 5.6</b> Archi percorso 2L da King's Cross St. Pancras a Westminster..	71
<b>Tabella 5.7</b> Nodi percorso 3L da King's Cross St. Pancras a Westminster..	72
<b>Tabella 5.8</b> Archi percorso 3L da King's Cross St. Pancras a Westminster..	72
<b>Tabella 5.9</b> Nodi percorso 4L da King's Cross St. Pancras a Westminster...	73
<b>Tabella 5.10</b> Archi percorso 4L da King's Cross St. Pancras a Westminster.....	74
<b>Tabella 5.11</b> Nodi percorso 5L, 6L, 7L da King's Cross St. Pancras a Westminster.....	75
<b>Tabella 5.12</b> Archi percorso 5L, 6L, 7L da King's Cross St. Pancras a Westminster.....	75
<b>Tabella 5.13</b> Nodi percorso 8L, 9L da King's Cross St. Pancras a Westminster.....	76
<b>Tabella 5.14</b> Archi percorso 8L, 9L da King's Cross St. Pancras a Westminster.....	76
<b>Tabella 5.15</b> Tempi di percorrenza da King's Cross St. Pancras a Westminster.....	77
<b>Tabella 5.16</b> Nodi percorso 1P da Gare de Paris Nord a Nation.....	83
<b>Tabella 5.17</b> Archi percorso 1P da Gare de Paris Nord a Nation.....	83
<b>Tabella 5.18</b> Nodi percorso 2P da Gare de Paris Nord a Nation.....	84
<b>Tabella 5.19</b> Archi percorso 2P da Gare de Paris Nord a Nation.....	85
<b>Tabella 5.20</b> Nodi percorso 3P da Gare de Paris Nord a Nation.....	86
<b>Tabella 5.21</b> Archi percorso 3P da Gare de Paris Nord a Nation.....	86
<b>Tabella 5.22</b> Nodi percorso 4P da Gare de Paris Nord a Nation.....	87
<b>Tabella 5.23</b> Archi percorso 4P da Gare de Paris Nord a Nation.....	88
<b>Tabella 5.17</b> Tempi di percorrenza da Gare de Paris Nord a Nation.....	89