

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Analisi del comportamento delle rocce sottoposte a carichi ciclici

Relatore:

Prof. Ing. Marilena CARDU

Candidato: Gregorio ZANEBONI

ANNO ACCADEMICO 2019 – 2020

30 Novembre 2020

Indice

1. Introduzione	9
1.1. Definizione di fatica	11
1.2. Perché studiare la fatica	11
1.3. Differenze tra lo studio a fatica dei metalli e delle rocce	14
1.4. Approccio allo studio del comportamento a fatica	15
2. Cenni storici sulla fatica dei materiali	18
2.1. Fatica dei metalli	18
2.2. Fatica delle rocce	
3. Classificazione della fatica	30
3.1. Classificazione basata sulla frequenza	30
3.2. Classificazione basata sul parametro di controllo	31
3.3. Classificazione basata sull'applicazione del carico	31
3.4. Classificazione basata sulla vita a fatica	32
3.5. Concetti di base sulla fatica	32
3.5.1. Carico dinamico e carico a fatica (ciclico)	32
3.5.2. Modello di carico	34
3.6. Tipologie di prove a fatica	35
3.6.1. Test di compressione a fatica	35
3.6.2. Test di trazione a fatica	
3.6.3. Test di taglio a fatica	38
3.6.4. Test torsionale a fatica	39
3.6.5. Test di flessione a fatica	39
3.6.6. Test a fatica statica	40
3.6.7. Test con cicli di congelamento-scongelamento	41
3.6.8. Test ciclici di bagnatura-essiccazione	42
3.7. Geometria dei provini sottoposti a test	43
4. Parametri che caratterizzano il comportamento a fatica delle rocce	44
4.1. Sollecitazione massima:	45
4.2. Tipo di roccia	46
4.3. Ampiezza del carico	47
4.4. Effetto della frequenza di carico	48
4.5. Modello di svolgimento della prova	49
4.6. Crepe e rottura iniziale	51
4.7. Caratteristiche dell'ammasso roccioso	52

4.8. Frammentazione	
4.9. Effetto della temperatura	59
4.10. Misurazioni alternative sperimentali	60
5. Ricerche analizzate	
5.1. Autori e tipologie di rocce analizzate	
5.2. Apparecchiature utilizzate per le prove e modalità di prova	
5.3. Materiale sperimentale	
5.4. Prove non distruttive sui provini	
5.5. Prove distruttive sui provini	
6. Modelli interpretativi dei risultati delle prove	
6.1. Curva S-N	
6.1.1. Curve totali e depurate	
6.1.2. Analisi della anisotropia della roccia	
6.1.3. Analisi in base ai differenti litotipi	
7. Conclusioni	
8. Ringraziamenti	
9. Bibliografia	
10. Elenco Figure e Tabelle	

Abstract

The cyclic load applied to civil and mining structures can lead to a reduction in the strength of the materials used, different from that which would occur with a monotonic load. Many cases can be found where the degradation of the rock parameters subjected to this type of loads leads to the presence of failure of the natural rock structures.

Among these, tunnel walls, pillars and slabs in the mining activities, roads with transit of heavy vehicles, abutments of bridges and dams can be included. Fatigue research is therefore crucial to a correct structural design, to avoid problems in the whole life of the structure.

However, the research concerning the behavior of geomaterials under cyclic load is largely developed on works aimed at a knowledge of the characteristics of the specific geomaterial, therefore it is difficult to elaborate a complete analysis, given the heterogeneity of the researches and the difficulty in characterizing unequivocally the material. For this reason, the present work aims to collect different laboratory investigations and compare them to achieve a better understanding of the phenomenon and design standards.

The discussion is initially developed through a general historical review of the concept of fatigue of metals and rocks with a synthetic collection of the most interesting literature on the subject. Then, the main cyclic fatigue tests with whom the rock samples are usually tested are reported and finally the main discoveries in this regard are listed.

In the last part of the thesis, a comparison is proposed between the different tests performed by the researches found in the literature. This experimental data are correlated in a graph representing the different curves in the Wohler diagram.

All this can be useful to fill the lack of design codes or standards in the field of cyclic stresses applied to geomaterials, the understanding of the effect of fatigue being of great interest in order to apply the correct choices in the design phase of engineering practice.

Riassunto

Il carico ciclico applicato a strutture civili e minerarie può portare ad una riduzione della resistenza dei materiali utilizzati, con differenze qualitative e quantitative rispetto a quella che si avrebbe mediante carico monotono. Sono infatti molti i casi nei quali la degradazione dei parametri della roccia sottoposti a questo particolare tipo di carico comporta una presenza di cedimenti delle strutture rocciose naturali.

Tra queste si possono annoverare pareti di tunnel, pilastri e solette in ambito minerario, strade con transito di mezzi pesanti, spalle di ponti e dighe. La ricerca sulla fatica è quindi argomento cruciale per una corretta progettazione strutturale, al fine di evitare problemi nel futuro della struttura.

Le ricerche riguardanti il comportamento sotto carico ciclico delle rocce sono però mirate ad una conoscenza delle singolari caratteristiche del geomateriale in esame, ed è pertanto difficile elaborare una trattazione che possa includere diversi studi, data l'eterogeneità delle ricerche e la difficoltà nel caratterizzare univocamente il materiale. Per questo motivo il presente lavoro si propone di raccogliere indagini di laboratorio differenti, mettendole successivamente a confronto per raggiungere una migliore comprensione del fenomeno ed eventuali standard di progettazione.

La trattazione si sviluppa inizialmente con una rivisitazione storica generale del concetto di fatica dei metalli e delle rocce, mediante una sintetica raccolta bibliografica dei più interessanti risultati in tale ambito. Quindi verranno riportati i principali test di fatica ciclica a cui è uso sottoporre i campioni di roccia ed infine saranno elencate le principali scoperte a riguardo.

Nell'ultima parte della trattazione sarà proposto un confronto tra le diverse prove eseguite da studi in letteratura, con l'obiettivo di correlare tutti i dati sperimentali reperiti in un grafico rappresentante le diverse curve nel diagramma di Wohler.

Tutto ciò sarà utile per colmare la mancanza di codici o standard di progettazione in ambito di sollecitazioni cicliche applicate ai geomateriali, essendo di grande interesse la comprensione dell'effetto della fatica nel corso della vita di una struttura, così da essere in grado di applicare le corrette scelte in fase di progettazione nella pratica ingegneristica.

1. Introduzione

Il comportamento a fatica è un comportamento meccanico tradizionalmente associato al campo dell'ingegneria che si verifica abitualmente in natura e nelle strutture sottoposte a carichi non continui nel tempo.

Il comportamento meccanico della roccia sotto carico statico è stato studiato in profondità; la stessa cosa non può essere detta per ciò che riguarda la reazione delle rocce a sollecitazioni cicliche e ripetitive generate da carichi esterni. La previsione del carico di rottura di strutture costituite da difetti e crepe e l'identificazione della combinazione dei parametri della sollecitazione e del difetto che portano al guasto sono pertanto le domande fondamentali dell'ingegneria strutturale e mineraria a cui vuole riferirsi questo lavoro di tesi.

Per quanto riguarda l'ingegneria strutturale e mineraria, la difficoltà nella pratica sta proprio nel prevedere con anticipo la degradazione dei parametri della roccia e delle strutture sottoposte ad un certo carico ciclico e in che modo la combinazione di parametri di geometria e intensità del carico portano ad un eventuale cedimento del materiale assoggettato a questo particolare tipo di sollecitazioni.

È ora ben noto che il carico ciclico è in grado di provocare la rottura di un materiale a un livello di sollecitazione inferiore alla sua resistenza sotto carico monotono o statico. Questo fenomeno, definito nella pratica ingegneristica "fatica", è stato accostato alle rocce solamente nella seconda metà del Novecento, inizialmente con studi piuttosto limitati, e solo dal 1970 con ricerche di tipo teorico e sperimentale ha iniziato ad essere oggetto di indagine.

Una fondamentale differenza tra il mezzo naturale e il materiale artificiale da costruzione è data dal fatto che le caratteristiche meccaniche del secondo sono in un certo senso scelte a priori dal progettista, mentre per quanto riguarda i geomateriali essi presentano una variabilità intrinseca data dalla loro composizione chimica, fisica e dalla storia geologica propria del complesso di cui fa parte la roccia.

I criteri di giudizio e le caratteristiche del comportamento del materiale in esame diventano così di fondamentale importanza per la definizione di parametri grazie ai quali sia possibile caratterizzare il comportamento ciclico e prevenirne eventuali danni. Questo lavoro di tesi si pone l'obiettivo di elaborare le ricerche presenti in letteratura per fornire una caratterizzazione delle rocce maggiormente impiegate nella pratica ingegneristica attraverso l'analisi di ricerche svolte durante gli ultimi trent'anni.

La giustificazione del lavoro risiede in tutte quelle operazioni di geo-ingegneria che affrontano problemi relativi alla stabilità e alla sicurezza delle strutture più o meno profonde. Il comportamento delle rocce sottoposte a carico ciclico è di fondamentale importanza nel definire i problemi riguardanti l'ingegneria degli scavi; si potrebbe essere potenzialmente in grado di prevedere gli effetti o prevenirne i danni legati alle sollecitazioni da sisma, sollecitazione dei mezzi di trasporto e di particolari lavorazioni. Gli esempi di pratico interesse della conoscenza del comportamento sotto carico ripetuto sono numerosi anche in termini di intenzionale distruzione del mezzo: basti pensare ai meccanismi di disgregazione con utensili mediante perforazione a rotopercussione, alle sollecitazioni alternate esercitate dai mezzi meccanici per distaccare e fratturare la roccia. Questa è tuttavia solo una piccola parte degli aspetti ingegneristici legati all'argomento: sono infatti coinvolti gli ambiti dell'ingegneria mineraria a grandi profondità (ingegneria degli scavi e gallerie), le fondazioni di strutture a giorno (sismi e carichi alternati), ma anche ambiti molto particolari come la fratturazione idraulica per l'estrazione mineraria ed i serbatoi di stoccaggio ad alta pressione di gas o liquidi in profondità.

In questo lavoro verrà inizialmente presentata una breve analisi storica inerente al concetto di fatica incentrata sul comportamento dei metalli, corredata dai primi passi verso la ricerca della conoscenza del comportamento a fatica delle rocce.

Successivamente verranno proposti i nuovi tipi di approcci e le tipologie di test utilizzate nella pratica, le scoperte riguardanti i parametri legati alle caratteristiche del carico ciclico ed infine confrontate alcune curve rappresentanti il comportamento dei provini sottoposti a prove di carico ciclico interessanti diversi tipi di materiali.

L'eterogeneità delle ricerche presenti in letteratura rende difficile l'unificazione mediante una singola teorizzazione analitica del cedimento a fatica: verranno pertanto confrontati i diversi metodi e riportate le conclusioni a cui giungono i diversi autori, anticipando tuttavia che non è stato riscontrato un metodo unificato che possa essere considerato ufficiale.

1.1. Definizione di fatica

Il cedimento per fatica è quello che si verifica sotto una sollecitazione ciclica o alternata di ampiezza che non causerebbe cedimento se fosse applicata una sola volta.

La fatica richiede carico ciclico, sollecitazioni di trazione e deformazione plastica su ogni ciclo. Se manca uno di questi, non ci sarà alcun cedimento. Il fatto che un materiale giunga a rottura dopo un certo numero di cicli indica che ad ogni ciclo deve verificarsi un cambiamento permanente. Ogni ciclo deve quindi produrre una certa deformazione plastica, anche se molto piccola. Metalli e polimeri cedono per fatica. I cedimenti per fatica della ceramica sono rari perché raramente si verificano deformazioni plastiche.

Possono essere distinte tre differenti fasi di affaticamento: la prima consiste nella nucleazione di una fessura mediante piccoli valori di deformazione plastica disomogenea a livello microscopico; la seconda è rappresentata dalla lenta crescita di queste crepe per sollecitazioni cicliche superiori ad un valore soglia; infine, nel terzo stadio vi è la frattura improvvisa che si genera quando le crepe raggiungono una dimensione critica.

1.2. Perché studiare la fatica

Alcune strutture rocciose come spalle di ponti, dighe, fondazioni stradali e pareti di tunnel sono soggette a carichi sia statici che ciclici a causa di stress quotidiani, tra cui si possono annoverare vibrazioni indotte da veicoli e mezzi pesanti, perforazioni, esplosioni e variazioni di carico agente sulle strutture. Questo tipo di carico spesso causa il cedimento della roccia a uno stress inferiore, provocando a volte gravi danni a strutture e persone. La progettazione di tali strutture richiede per questo motivo la comprensione e la ricerca delle proprietà meccaniche delle rocce in varie condizioni di carico.

Il carico ciclico spesso causa il cedimento di materiali fragili, come ceramiche e rocce a un livello di sollecitazione inferiore alla loro resistenza determinata in condizioni monotone. Alcune rocce però, essendo caratterizzate da proprietà geomeccaniche molto variabili, possono migliorare le proprie caratteristiche, diventando più forti e più duttili, mentre altre, sottoposte alla medesima sollecitazione delle prime, diventano più deboli e più fragili.

Il cedimento della maggior parte dei materiali rocciosi è essenzialmente un processo di propagazione delle cricche che rende i criteri di rottura macroscopici insufficienti per descrivere il processo di frattura delle rocce. Una volta che una fessura si è aperta, lo stato di stress vicino alla punta della fessura viene alterato in modo significativo. Ciò rende cruciale la previsione della direzione di propagazione della fessura e l'orientamento della frattura in un materiale roccioso fragile.

Faglie, piani di assestamento, pareti di tunnel, tetti e solette, spalle di ponti, fondazioni di dighe e strade sono solo alcune delle strutture rocciose naturali e artificiali con le quali abbiamo a che fare ogni giorno che possono essere indebolite dalla fessurazione indotta da carichi ripetitivi.

Le scienze interessate sono quindi l'ingegneria, la geologia, la geomorfologia e la geofisica.

Quando è sottoposta a carico ciclico, la roccia mostra questo particolare comportamento a fatica, in cui la sua deformazione residua cambia in ognuno dei cicli di carico tra le sollecitazioni massime e minime indotte. È importante studiarne il comportamento per comprenderne al meglio ogni suo aspetto, per potere adottare le corrette scelte in fase di progettazione. La ricerca sulla fatica è quindi argomento centrale di una corretta progettazione strutturale per evitare problematiche nel futuro della struttura.

Ulteriori applicazioni ingegneristiche hanno messo in risalto l'importanza della conoscenza della reazione della roccia a questa tipologia di sollecitazione: è il caso dei serbatoi di stoccaggio per gas e liquidi a grande profondità, caratterizzati da caverne di salgemma in grado di autoripararsi grazie all'eccellente duttilità e con permeabilità quasi nulla per evitare fuoriuscite all'esterno del deposito. L'attenzione rivolta a questo materiale è però relativa ai carichi ciclici a cui esso può essere sottoposto, essendoci molti cambiamenti di pressione dovuti all'iniezione e al prelievo del materiale. La conoscenza del comportamento a fatica del salgemma diventa quindi di estrema importanza per garantire il corretto funzionamento e la sicurezza nelle operazioni di lavorazione. I fattori che influenzano fortemente le caratteristiche di fatica delle rocce in questo caso includono i valori e l'ampiezza della sollecitazione, la temperatura e la frequenza di carico.

Le formazioni rocciose, così come le strutture rocciose, essendo composte da minerali differenti, mostrano risposte diverse quando sono soggetti a carico ciclico, e l'estrema eterogeneità delle rocce in questo senso non è per niente di aiuto alla ricerca. È poi raro che grandi porzioni di roccia connesse alle strutture da realizzare o già realizzate siano trovate senza fratture, crepe o discontinuità preformate.

La conoscenza delle caratteristiche di fatica potrebbe anche aiutare a migliorare la tecnologia connessa con la disgregazione della roccia in posto. È cosa nota che i pionieri dello studio sperimentale della fatica cercassero il modo migliore per indurre la roccia alla fratturazione nel più breve tempo possibile attraverso gli utensili comunemente usati ancora oggi per la perforazione. Oggi la ricerca si è spostata verso il mondo della perforazione profonda ed in particolare esistono studi riguardanti la fratturazione idraulica, e di come questa può essere implementata grazie alla conoscenza degli effetti del carico ciclico per creare e poi propagare una rete di fratture nel modo migliore in uno strato roccioso nel sottosuolo. La fratturazione in questo caso viene eseguita dopo una perforazione dentro una formazione di roccia contenente idrocarburi, per aumentarne la permeabilità al fine di migliorare la produzione del petrolio o del gas da argille contenuti nel giacimento e incrementarne il tasso di recupero. Più elevato sarà il grado di fratturazione, maggiore sarà il recupero di idrocarburi dal giacimento.

In molti progetti ingegneristici, come cavità sotterranee, fondazioni e discariche molta attenzione è rivolta al comportamento della roccia sottoposta a carichi dinamici: un cedimento della roccia in queste strutture non è mai tollerato. Tuttavia, fino ad ora, la natura del cedimento dinamico nella roccia rimane poco chiara, soprattutto in condizioni di carico ciclico. È ben noto che il carico ciclico spesso causa la degradazione prematura dei parametri di un materiale roccioso senza alcun segnale macroscopico a un livello di sollecitazione inferiore alla sua forza determinata sotto carico monotono. Pertanto, una migliore comprensione del comportamento a fatica potrebbe aiutare i progettisti a preparare un progetto più razionale in grado di evitare il disastro ingegneristico. Negli ultimi anni, sono stati compiuti notevoli sforzi per studiare la risposta della roccia al carico ciclico.

Piccoli carichi dinamici si propagano continuamente attraverso le vibrazioni naturali della crosta terrestre, ma la rottura per fatica necessita comunque di una soglia minima, al di sotto della quale non ci sono ripercussioni sul mezzo. Le grandi forze dinamiche vengono applicate in modo intermittente soprattutto durante grandi terremoti ed esplosioni.

Uno degli obiettivi principali della ricerca sulla fatica delle rocce è stato quello di stabilire una relazione tra il numero di cicli e la riduzione dell'ampiezza della sollecitazione applicata (l'approccio della curva S–N). Le difficoltà più grandi stanno in questo caso nell'analisi dei risultati per la scarsità di dati sperimentali e la mancanza di unificazione delle metodologie di prova. Una migliore comprensione della fatica ciclica in condizioni particolari potrebbe aiutare i pianificatori a preparare un progetto più razionale così da prevenire i danneggiamenti prematuri sulla struttura.

Una padronanza adeguata e dettagliata di come le proprietà meccaniche delle rocce cambiano quando soggette a diversi scenari di carico è ciò che viene richiesto per la progettazione e la costruzione sicura e corretta di strutture di ingegneria civile, mineraria e geotecnica. Per esempio la conoscenza della stabilità di uno scavo sotterraneo non può essere raggiunta solamente mediante l'analisi della struttura rocciosa, delle caratteristiche geologiche e dello stato di sollecitazione in situ, in quanto occorre anche pieno controllo del tipo di carico che può essere applicato.

1.3. Differenze tra lo studio a fatica dei metalli e delle rocce

Le difficoltà nello studio della sollecitazione a carico ciclico sulle rocce derivano dalla dispersione dei risultati e la loro riproducibilità per la stessa natura variabile della roccia. Per quanto riguarda le prove di laboratorio si effettuano generalmente prove di carico ciclico a compressione, mente per i metalli le prove sono in generale a flessione rotante: ne deriva dunque che a parità di cicli la prova a compressione richiede una durata molto maggiore. Oltretutto il cedimento nei due casi è diverso: la prova a flessione rotante comporta una divisione del provino in due parti mentre il cedimento a compressione avviene con disgregazione del provino stesso, non rendendo semplice l'indagine dei piani di rottura.

I metalli, essendo materiali artificiali, hanno una storia meccanica nota, assenza di porosità e difetti: per essi si può pertanto garantire una ottima analisi del provino e di eventuali lesioni presenti, cosa molto più complicata per quanto riguarda le rocce.

A scala micromeccanica i metalli sono omogenei, a differenza delle rocce, caratterizzate spesso da grandi differenze nella composizione mineralogica. In ultimo bisogna sottolineare che il materiale metallico prodotto, essendo specifico per quel compito, avrà caratteristiche meccaniche ed elastiche determinate a priori esattamente per lo scopo di utilizzo.

1.4. Approccio allo studio del comportamento a fatica

Nella seconda parte di questa tesi verranno confrontate ricerche sulla fatica svolte su provini di rocce da oltre trent'anni provenienti da differenti zone, con differente strumentazione e modalità di test, in modo da proporre una trattazione nella quale si possano valutare l'evoluzione della tecnica e della ricerca negli anni ed eventuali particolarità di indagine.

Il comportamento a fatica di questi materiali rocciosi è stato indagato a fondo solamente nell'ultimo ventennio, ed in misura assai meno approfondita rispetto ai materiali resistenti artificiali. Ecco perché in questo lavoro verranno riportati le principali particolarità dello studio della fatica di rocce di differente natura sia dal punto di vista sperimentale sia dal punto di vista analitico. Dopo una panoramica riguardante i parametri che influenzano il comportamento a carico ciclico dei geomateriali verrà presentato un capitolo contenente la comparazione di più dati sperimentali reperiti in letteratura, mediante un diagramma riportante rispettivamente la sollecitazione applicata e il numero di cicli di carico.

L'obiettivo della ricerca sulla fatica è quello di giungere ad una teoria avente validità generale, anche se le difficoltà per raggiungerlo sono notevoli, soprattutto per materiali eterogenei quali le rocce. È però evidente che lo studio interpretativo deve essere programmato caso per caso per i diversi geomateriali, essendo riscontrabile dalle prove che l'affaticamento di una roccia ignea sia cosa diversa, in scala microscopica, dall'affaticamento di una roccia sedimentaria, anche se visualizzato da una curva S-N (sollecitazione massima/numero di cicli a rottura) analoga. Così verranno discusse le principali scoperte riguardanti la ricerca ed esposti commenti a riguardo.

Verranno di seguito elencati alcuni impieghi comuni dei carichi ciclici applicati a strutture in roccia durante i quali può verificarsi il cedimento:

- Uso di elementi strutturali in pietra sottoposti a carichi ciclici imposti da particolarità del loro impiego (strutture di ponti, basamenti di macchine vibranti...);
- Sollecitazioni causate dalla movimentazione di mezzi pesanti in cantiere;
- Uso di elementi particolari in pietra sottoposti a cicliche escursioni termiche e conseguenti sollecitazioni da deformazione impedita;
- Rocce esposte all'effetto delle intemperie e sottoposte nel ciclo di vita a continui cambiamenti di temperatura estremi;

- Opere di sostegno naturali (pilastri e solette) in miniera, sottoposte a variazioni di carico ripetute derivanti dall'evoluzione delle situazioni nell'attività di coltivazione;
- Degrado della roccia in posto conseguente alla ripetuta azione d'urto derivante da lavori di abbattimento con esplosivo;
- Demolizione della roccia con mezzi meccanici che agiscono tramite urti ripetuti (martello demolitore, perforatore rotopercussione);
- Comminuzione, perforazione e altre operazioni su materiali rocciosi effettuate con apparecchiature sfruttanti l'effetto delle vibrazioni.

Mentre nei materiali artificiali (metalli, ceramiche ed altri) si riscontra, ad un esame anche superficiale, una generica costanza di comportamento meccanico, nei materiali rocciosi questo non accade spesso, anche se essi provengono dallo stesso corpo geologico e sono apparentemente uguali ad un primo esame visivo. Una roccia è definita da un certo contesto in cui si viene a formare, da una certa area geologica in cui si trova, da caratteristiche di composizione chimica peculiari che le competono e da intervalli più o meno ampi di comportamento meccanico che è compito dell'ingegnere determinare. Esse oltretutto non hanno lo scopo intrinseco di essere un materiale da costruzione, anche se molte volte sono impiegate come aggregati per la composizione di materiali da costruzione.

Questo aspetto fa sì che due campioni di roccia provenienti dalla stessa zona possano esibire comportamenti differenti e resistenza differente: per questo motivo, ovviamente, il comportamento a fatica non può essere espresso dal comportamento di un solo provino, come del resto accade per tutte le prove di caratterizzazione delle rocce in laboratorio.

La valutazione del comportamento a fatica richiede numerose prove che, avendo carattere distruttivo, richiedono altrettanti provini dello stesso materiale. Ma se nel caso di un materiale da costruzione artificiale questi provini hanno pressoché identiche caratteristiche meccaniche essendo stati creati artificialmente, la stessa cosa non vale per le rocce e per questo motivo risulta impossibile eseguire più prove su provini identici che, pur essendo dello stesso materiale, possono ampiamente differire per comportamento meccanico.

Nel caso di un materiale geologico le prove di carico ciclico sui provini non forniscono una relazione biunivoca fra la sollecitazione S che provoca la rottura del provino ed il numero N di cicli in cui essa si verifica, ma una dispersione di punti nel piano S - N.

Lo studio degli effetti di questi carichi riprodotti in laboratorio può pertanto fornire alcune delucidazioni per interpretare il comportamento nei confronti della progettazione finale con cui vengono a coesistere struttura e roccia.

2. Cenni storici sulla fatica dei materiali

2.1. Fatica dei metalli

Fino all'inizio dell'Ottocento la comprensione e la caratterizzazione dello stato di sollecitazione era stata investigata solo nelle condizioni che comportavano eventi di rottura associati ad eccessivi carichi, oppure a carenze intrinseche dei materiali utilizzati, progettuali e costruttive. La ricerca del motivo di un certo comportamento dei materiali era collegata solamente all'evento finale di rottura, essendo quella la parte maggiormente visibile e che destava più stupore, venendo in questo modo a mancare tutta la spiegazione del comportamento dei materiali e dei manufatti ad esso connessi.

Già in tempi antichi, la conoscenza "sperimentale" del comportamento a fatica dei materiali veniva sfruttata dall'uomo per gli scopi più disparati: è però solo a metà del XIX secolo che l'impiego sempre più esteso delle leghe metalliche e di dispositivi meccanici causarono alcuni incidenti ferroviari verificatesi in Germania. Questi avvenimenti stimolarono le prime ricerche sulla natura della fatica, il cui comportamento fu scientificamente analizzato per la prima volta dall'ingegnere minerario tedesco Albert, il quale pubblicò, nel 1838, il primo articolo scientifico sulla fatica, stabilendo una correlazione fra i carichi applicati e la durata delle catene impiegate nell'ambiente di miniera. Albert si accorse che le catene usate per il trasporto nella miniera dove lavorava potevano facilmente cedere e rompersi anche se sottoposte a carichi decisamente minori rispetto alla resistenza ultima del materiale. Per primo evidenziò quindi che alcune porzioni di metallo sottoposte a carichi alternati non potevano essere progettate solamente in base alle proprietà di resistenza statica del materiale. Fu la prima ricerca scientifica riguardante il comportamento a fatica.

Poncelet, professore di meccanica in Francia, nel 1839 coniò il termine fatica per descrivere il particolare tipo di rottura: egli descrisse i metalli sollecitati ripetutamente con carichi non elevati come "affaticati" dalla ripetizione dello sforzo. In particolare, nel suo libro "Introduction à la Mècanique Industrielle Physique ou Expérimentale", scrisse che le molle sollecitate da una forza ciclica, inferiore alla resistenza massima, giungono a rottura nel lungo periodo.

Una ulteriore prova della conoscenza di questo meccanismo di frattura è data dal fatto che i vagoni ferroviari in Francia venivano ispezionati per le crepe da fatica già nel 1853, a seguito di incidenti verificatesi qualche anno prima. Intorno al 1850, in Inghilterra furono scritti numerosi articoli sulla fatica riguardanti le rotture presentatesi negli assali dei vagoni ferroviari e delle ruote delle carrozze, sottoposte a cicli di compressione e trazione.

Bisogna però attendere gli anni successivi per trovare il primo vero studioso del fenomeno, l'ingegnere delle ferrovie tedesche A. Wohler (1819-1914): egli fu il primo a svolgere una ricerca sistematica sulla fatica (riferita agli assali dei vagoni ferroviari) finalizzata a scoprirne gli aspetti fino ad allora incompresi. Egli volle indagare sul perché di alcune particolari rotture sugli assali, arrivando a dimostrare che il materiale non potesse resistesse indefinitamente se sottoposto ad una sollecitazione inferiore al limite di elasticità dello stesso, concetto fino ad allora considerato universamente valido. Sviluppò una propria attrezzatura rudimentale (Figura 1) in grado di applicare ciclicamente un carico e di testare il limite a fatica a flessione rotante.



Figura 1 Apparecchio rappresentante la macchina di prova del tipo a trave a sbalzo rotante concepita da Wohler: i provini d'acciaio (S) sono sottoposti a carico mediante le molle P e posti in rotazione dalla puleggia D.

Egli ebbe la geniale idea di introdurre una curva che mettesse in relazione il carico applicato con il numero di cicli a cui sottoponeva il materiale, a cui diede il nome di curva S-N (anche chiamata curva di Wohler in onore del suo inventore); riuscì in questo modo a porre le ricerche riguardanti la fatica su un piano più scientifico e quantitativo, associando questa relazione alla vita a fatica del materiale. L'approccio di Wohler presentava però il limite di poter condurre solamente prove con ampiezza di carico costante, vista la geometria della macchina di prova.

La curva, ancora oggi utilizzata come standard di riferimento per la caratterizzazione di prodotti per l'edilizia, si è evoluta con la ricerca mettendo in relazione anche ulteriori parametri per descriverne meglio il comportamento prima del cedimento. Le caratteristiche fondamentali della curva verranno descritte approfonditamente nel capitolo 6.

Alcuni anni dopo la pubblicazione dei risultati di Wohler, Johann Baushinger, imponendo ad un materiale metallico dei cicli di deformazione trazione-compressione tra valori uguali e tali da superare lo snervamento, rilevò un particolare andamento della curva sforzo-deformazione, con un valore di snervamento a compressione inferiore a quello ottenuto durante la prima sollecitazione a trazione. Il principale obbiettivo di questi primi studi era quello di definire delle procedure sperimentali in grado di quantificare la resistenza a fatica di un determinato materiale, in termini di numero di cicli a rottura.

Un ulteriore passo avanti nella ricerca si ebbe quando Sorby con l'impiego sistematico del microscopio riuscì ad approfondire la conoscenza sul meccanismo della fatica analizzando nel dettaglio le superfici di frattura dei metalli.

Ai primi del '900 Ewing e Humfrey impiegarono la metallografia per documentare sistematicamente la formazione di cricche superficiali e i cambiamenti strutturali indotti sulla superficie del provino sollecitato ciclicamente in laboratorio, notando l'aumento della presenza delle linee di scorrimento con il procedere della sollecitazione ciclica.

Descrissero quindi i notevoli cambiamenti nel corso della prova dovuti allo sviluppo di piani di scorrimento attraverso i grani cristallini accentuati in funzione dell'aumento del numero di inversioni di carico, sino al momento della comparsa di cricche, seguita dalla caratteristica frattura dovuta alla fatica.

Nel 1910, O.H. Basquin rappresentò la regione a vita finita delle curve di Wohler utilizzando un diagramma bilogaritmico (log σ – log N), descrivendo questa zona con la semplice formula:

$$\sigma a = \sigma f (Nf)^n$$

Basquin tabulò dei valori sperimentali dei coefficienti σ_f ed N utilizzando principalmente i valori ottenuti da Wohler più di cinquant'anni prima, a testimonianza del fatto che successivamente a Wohler l'attività sperimentale, almeno dal punto di vista della determinazione di curve S - N, non era molto progredita.



Figura 2 Esempio di curve S-N per i metalli con, in ordine dall'alto, coordinate cartesiane, coordinate semilogaritmiche e coordinate bilogaritmiche (Moore and Kommers, 1927)

Negli anni '920 Gough e Honson riportarono le modificazioni del materiale e i cambiamenti strutturali durante i cicli di carico e scarico mediante l'utilizzo di microfotografie. Con la scoperta dei raggi X si ebbe la possibilità di penetrare ad una certa profondità ed ottenere informazioni sulle variazioni della struttura cristallina. Nel 1936 Gough o Wood poterono, per mezzo di spettri di diffrazione, studiare il problema limitatamente ai singoli cristalli; così gli stessi autori provarono che i cambiamenti strutturali prodotti da carichi ciclici differivano sostanzialmente da quelli prodotti con carichi statici sullo stesso materiale.

Kommers già nel 1927, osservò che sotto un carico ciclico con particolari requisiti le proprietà meccaniche statiche del materiale metallico erano notevolmente cambiate, proprietà che non peggioravano progressivamente come invece inizialmente supposto: parve invece che queste andassero trasformandosi, nelle prime fasi migliorandone la resistenza statica, mentre alla fine degradandone le virtù.

Ciò indusse a determinare le proprietà statiche dei materiali metallici prima, dopo e durante l'applicazione di carichi ripetuti di vario genere. Nel frattempo lo stesso autore insieme a Moore pubblicò il libro "The fatigue of metal" (1927) dove venivano raccolte tutte le scoperte fatte fino quel momento con alcuni riferimenti alle curve di Wholer (Figura 2).

In ultima istanza, con l'introduzione del microscopio elettronico si riuscì ad approfondire lo studio dei cambiamenti strutturali che si verificano a causa dell'applicazione di carichi alternati: si dimostrò che nel materiale plasticamente deformato si sviluppavano piani di scorrimento e che le proprietà meccaniche statiche di un materiale che presentasse questi piani erano spesso sensibilmente differenti rispetto a quelle possedute originariamente.

Nel 1945, Miner divulgò ed implementò un approccio sviluppato venti anni prima da Palmgren, proponendo l'accumulo lineare del danno a seguito di sollecitazioni applicate di ampiezza differente. Secondo questo approccio, il danno accumulato dal materiale per effetto della sollecitazione ciclica è proporzionale al rapporto tra il numero di cicli che il componente ha subito (n) sottoposto ad una certa sollecitazione σ_a ed il numero di cicli (N) che provoca la rottura allo stesso livello di sollecitazione σ_a .

Il danno complessivo accumulato dal materiale per effetto della successione di carichi ciclici è quindi ottenuto mediante la sommatoria dei danni relativi ad ogni livello di carico:

$$1 = \frac{n1}{N1} + \frac{n2}{N2} + \frac{n3}{N3} + \cdots$$

con il verificarsi della rottura per:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{ni}{Ni} \ge 1$$

Nel 1954, Coffin e Manson, lavorando indipendentemente su problemi di fatica termica, proposero una caratterizzazione della vita a fatica basata sull'ampiezza della deformazione plastica. Infatti, notarono che il legame fra il logaritmo dell'ampiezza della deformazione plastica $\Delta \varepsilon_p/2$ ed il logaritmo del numero di cicli a rottura 2Nf era sostanzialmente lineare:

$$\frac{\Delta \varepsilon p}{2} = \varepsilon f(2Nf)^2$$

A cavallo tra gli anni '950 e '960, attraverso lo sviluppo della teoria della meccanica della frattura, venne impiegato un approccio più maturo per la caratterizzazione della resistenza alla fatica dei metalli.

Nel 1957 Irwin introdusse il concetto del fattore di intensificazione degli sforzi K e successivamente nel 1963 Paris, attraverso l'analisi dell'effetto dell'applicazione ripetuta dei carichi sull'avanzamento del difetto, propose una legge in grado di mettere in relazione il fattore di intensità dello stress N con la crescita della cricca subcritica in un regime di stress da fatica a, con una formula relativamente semplice:

$$\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{dN}} = \mathrm{C} \ (\Delta \mathrm{K})^n$$

Nella quale C e n sono costanti dipendenti dal materiale.

Egli osservò che i dati sperimentali relativi agli avanzamenti del difetto in funzione delle diverse condizioni (carico crescente o cricca iniziale di dimensione diversa) si compattavano su un'unica curva in diagramma bilogaritmico.

Paris ha anche notato che la sollecitazione massima consentita dipende dall'intervallo di sollecitazione, e che essa aumenta all'aumentare della sollecitazione minima.

Le conclusioni a cui giunse Paris mediante il suo approccio al problema sono state di fondamentale importanza: basti pensare che questa equazione è ancora adottata per valutare il criterio di crescita delle cricche per il carico di fatica e per la progettazione strutturale.

Nei decenni successivi sono state proposte delle modifiche alla formulazione, nella ricerca della descrizione della correlazione fra $\frac{da}{dN} e \Delta K$ oltre allo stadio lineare nella zona di rottura e nelle fasi di comparsa della cricca.

Fra gli anni '970 e '990, grazie al notevole interesse dimostrato dall'industria (prime fra tutte, quella nucleare e quella aerospaziale), si è riscontrato un notevole aumento dell'attività di ricerca riguardante quest'ambito, focalizzando l'attenzione sui meccanismi

di propagazione della cricca e sulla loro interazione con la microstruttura delle leghe con cui hanno a che fare le differenti lavorazioni.

Con il grande sviluppo tecnologico ed informatico, la facilità di calcolo è aumentata esponenzialmente e grazie a ciò negli ultimi decenni la qualità dell'indagine è migliorata grazie anche ai numerosi modelli numerici in grado di simulare il comportamento dei materiali metallici a fatica (ad esempio i metodi ad elementi finiti FEM). Tutto questo ha permesso un avanzamento nella ricerca sistematica basata sull'approccio numerico e ha dimostrato come esso può spiegare la natura dei differenti materiali sottoposti a carico di fatica. Sono state concepite nuove apparecchiature ora indispensabili per le differenti prove a carattere ciclico ed inoltre un grande sviluppo della ricerca a livello metallografico è stato fornito dai microscopi elettronici a scansione (SEM).

Lo studio di fenomeni analoghi alla fatica dei metalli in materiali non metallici ebbe inizio più tardivamente e solo negli ultimi anni sta prendendo consapevolezza l'importanza di caratterizzare anche materiali di diversa natura sottoposti a carico ciclico.

Ad oggi la ricerca riguardante lo studio della fatica dei materiali non è unicamente focalizzata su materiali metallici e artificiali ma anche su geo-materiali e bio-materiali risultati soggetti a questo tipo di comportamento.

2.2. Fatica delle rocce

Il comportamento meccanico della roccia sotto carico statico è stato studiato a fondo; la stessa cosa non si può dire per ciò che riguarda la reazione delle rocce a sollecitazioni cicliche e ripetute generate da carichi alternati. È ben noto che il carico ciclico spesso provoca la rottura di un materiale a un livello di sollecitazione inferiore alla sua resistenza sotto carico monotono o statico. Questo fenomeno, definito nella pratica ingegneristica fatica, è stato accostato ai geomateriali solamente nella seconda metà del Novecento, con studi piuttosto limitati, e successivamente solo dal 1970, con ricerche di tipo teorico e sperimentale, ha iniziato ad essere indagato in modo sistematico.

I problemi legati all'argomento della fatica delle rocce in ambito ingegneristico sono legati alla difficoltà di caratterizzazione di una roccia a causa dell'eterogeneità delle sue caratteristiche fisiche e meccaniche.

Se da un lato la ricerca sui metalli è molto consistente perché iniziata con cent'anni di anticipo, l'elemento che maggiormente distingue i due universi di ricerca sui materiali

artificiali rispetto ai materiali rocciosi è la possibilità di ottenere dei provini in serie con caratteristiche pressoché uguali; il comportamento del materiale sarà così individuabile mediante curve o comportamenti peculiari per lo stesso materiale artificiale. La stessa cosa non può essere detta per le rocce.

Nel campo delle rocce la vera ricerca si può dire sia iniziata nei primi anni '960 con gli studi di Burdine nel 1963 finalizzati alla comprensione del meccanismo di danneggiamento mediante utensili perforanti attraverso carichi ciclici su un'arenaria. L'autore ha testato campioni di roccia cilindrica utilizzando un apparato di sollecitazione dinamica progettato e costruito in laboratorio per indagare sul danno cumulativo di campioni di roccia soggetti a sollecitazioni cicliche in varie condizioni di carico; egli descrive la rottura a fatica della roccia come il risultato di un danneggiamento cumulativo creato dall'applicazione ciclica dello stress. Burdine (1963) conclude inoltre segnalando l'assenza di dipendenza dalla frequenza del carico, vista la dispersione dei risultati.

Successivamente Bezael, Haimson e Kim (1971) mediante l'utilizzo di una pressa servocontrollata elettroidraulica eseguono nuove sperimentazioni su campioni di marmo sottoposti a compressione ciclica fino ad un massimo di 10⁶ cicli. I risultati vengono espressi secondo le curve S-N controllando inoltre la variazione delle caratteristiche elastiche durante la prova (irrigidimento del materiale col tempo). Gli stessi autori pubblicheranno una ulteriore ricerca sull'emissione acustica del danno a fatica ciclica individuando il raggiungimento dello stress limite nel momento in cui l'emissione acustica segnala l'inizio della micro-fratturazione.

Douglas, Mc Dougall e Scholz, Kranz in due differenti studi valutano il comportamento a rottura per fatica del granito (1973).

Atewell e Farmer (1973) prendono in esame dei campioni di dolomia, proponendo una teoria della resistenza a fatica in condizioni di compressione basata sull'influenza dei cicli di carico rispetto al numero dei cicli a rottura.

Lo studio del comportamento a fatica nei diversi casi di compressione, trazione e trazionecompressione è tutt'oggi molto raro ed i primi ad occuparsi di questo particolare argomento furono Peng, Podneiks e Cain (1974) analizzando il comportamento di un calcare. Essi valutarono la modificazione dei cicli di isteresi durante la prova, proponendo un indice del progressivo danneggiamento del materiale rappresentato dall'aumento della deformazione con il progredire dei cicli. Inoltre gli stessi autori proposero uno studio (1974) finalizzato all'applicazione di carichi ciclici ad alta frequenza (10 kHz) fino all'applicazione di 10⁸ cicli, presentando una relazione tra l'energia specifica di rottura ed il numero di cicli necessari a giungere a rottura, con diversi valori del carico massimo. Conclusero inoltre che la rottura a fatica sotto alta frequenza può avvenire per carichi che raggiungono solo il 30% della resistenza a trazione.

Prove di carico ciclico a flessione con diverse frequenze di carico sul granito sono state eseguite da Montoto (1974) che indaga la fratturazione della superficie con il microscopio elettronico a scansione. L'autore utilizza questa particolare modalità di prova poiché riferisce l'impossibilità degli studi al microscopio con provini ottenuti mediante rottura con carico ciclico a compressione. Nello studio con il microscopio a scansione identifica delle caratteristiche striature sulla superficie di frattura, tipiche della rottura a fatica anche di altri materiali.

Vengono proposti da Nishimatsu et al. (1974) modelli reologici di tipo lineare viscoelastico e non lineare visco-elastico per fornire una spiegazione dei fenomeni di fatica su cinque tipi di roccia differenti.

Studi riguardanti la frequenza di applicazione del carico sono stati proposti da Brighenti (1976), che ha sviluppato tre successive ricerche presentando i risultati di prove di resistenza a carico ciclico a compressione su quattro tipologie di rocce, effettuate mediante pressa idraulica servocontrollata ed utilizzando frequenze piuttosto basse (da 0,01 a 0,1 Hz) fino a 10⁵ cicli. La ricerca è stata conclusa non rilevando un'influenza della variazione di frequenza entro tale campo sui risultati. Su alcuni materiali lo stesso autore ha anche eseguito prove di fatica a trazione e a taglio, su roccia asciutta e su roccia bagnata, rilevando non solo un sensibile indebolimento della roccia bagnata, ma anche una diminuzione del numero di cicli occorrenti per giungere a rottura. Su uno dei materiali indagati, quale il gesso, ha rilevato un aumento della resistenza in seguito alla sollecitazione ciclica.

Homand-Etienne et al. (1983) hanno studiato il comportamento a fatica a compressione di due rocce (granito e marmo), seguendo l'evoluzione dei cicli di isteresi in funzione del numero di cicli sopportati. Le curve S/N sono risultate sensibilmente diverse per i due materiali. Seguendo i concetti già esposti da Attewell e Farmer dieci anni prima (1973), gli autori cercano di correlare la fenomenologia del cedimento per fatica ciclica a quella del creep, riconoscendo anche nella fatica ciclica le tre caratteristiche fasi del processo di creep.

Sull'influenza della deformazione sul comportamento a fatica della roccia, Akai (1983) scoprì che il cedimento per fatica nelle prove di compressione uniassiale era determinato dalla deformazione assiale sviluppata nei campioni. Ge (1987) ha diviso le relazioni per la deformazione residua rispetto al numero dei cicli di carico cui la roccia era sottoposta in tre fasi: primaria, costante e di rottura.

Nei test di compressione ciclica uniassiale, Ge e Lu (1987) hanno scoperto che esiste una soglia di sollecitazione assiale per il cedimento per fatica di una roccia, e che la sollecitazione assiale alla soglia è vicina alla sollecitazione di snervamento della roccia.

Ishizuka e Abe arrivano a dimostrare nel 1990 che la vita a fatica delle rocce aumenta con l'aumento della frequenza di carico, e la resistenza alla fatica delle rocce in condizioni sature è di circa il 7% inferiore a quella in condizioni asciutte.

Tien et al. (1990) hanno studiato il comportamento di deformazione, pressione dei pori e fatica utilizzando carichi quasi statici, ripetuti e ciclici su arenarie sature, andando ad indagare quindi anche l'approccio relativo al contatto con l'acqua.

Li et al. (1992) sono tra i primi a sviluppare prove cicliche di trazione brasiliana su provini di arenaria ampliando quindi le modalità di sperimentazione che fino ad allora si erano fermate alla valutazione di test di compressione uniassiale e triassiale.

Cattaneo e Labuz (2001) sono i primi a sperimentare test a flessione per campioni di marmo.

Ulteriori lavori di ricerca sono dedicati alla protezione contro le minacce ambientali: la progettazione di tunnel contro i terremoti (Hashash et al. 2001), la previsione di pericolosità vulcanica (Kendrick et al. 2015, Heimisson et al. 2015), La valutazione dei cicli di gelo-disgelo sui tunnel costruiti in zone ostili con climi freddi (Zhang et al. 2008, Liu et al 2014, Jia et al. 2018) e l'effetto provocato dalle onde del mare sulle coste.

Altre ricerche particolari sono per esempio gli studi dell'invecchiamento dei pilastri a causa di variazioni del livello di falda (Sorgi e De Gennaro 2011) o di stima della stabilità a lungo termine di vecchi monumenti (Cattaneo e Labuz 2001, Jamshidi et al. 2013) o di edifici (Hale e Shakoor 2003) contro gli agenti atmosferici.

Gran risalto infine viene dato negli ultimi anni ai serbatoi di stoccaggio per gas e petrolio (Wang et al. 2016, Voznesenskij et al. 2017), costituiti da ammassi di salgemma che vengono riempiti e sottoposti a cicli di carico e scarico dovuti all'immagazzinamento del materiale. Il carico ciclico imposto è di grande entità e una perdita delle caratteristiche di resistenza di queste rocce-serbatoio potrebbe comportare gravi danni sia economici sia ambientali.

Inoltre la ricerca sull'accumulo di energia ad aria compressa (CAES) è diventata molto popolare grazie alla prospettiva che potrebbe essere utilizzata per regolare lo squilibrio derivante da un uso insufficiente di energia eolica o solare: il pompaggio dell'aria nei vecchi pozzi di estrazione come serbatoi sotto la superficie terrestre genera anche in questo caso sollecitazioni cicliche sull'ambiente che potrebbe risentirne sul lungo periodo (Steffen 2012, Pujades et al. 2016).

Le conclusioni investigate dai diversi autori sono molto significative per affrontare al meglio i problemi relativi alla stabilità e alla sicurezza delle strutture interessanti sia gli ambiti dell'ingegneria mineraria a grandi profondità (ingegneria degli scavi e gallerie) sia le fondazioni di strutture a giorno sottoposte a questa tipologia di carichi (sismi e carichi alternati).

Bagde e Petros (2005, 2009) hanno riscontrato che la forza dinamica era influenzata dalla forma d'onda e dalla velocità di applicazione del carico nei test di compressione ciclica uniassiale. Xiao et al. (2010) hanno analizzato i vantaggi e gli svantaggi di sei espressioni di variabili di danno nel descrivere il comportamento a fatica della roccia in base ai dati di prova per il granito sotto carico ciclico in prove di compressione ciclica uniassiale. Fuenkajorn e Phueakphum (2010) hanno eseguito una serie di test sul salgemma sotto carico statico e ciclico e hanno scoperto che la resistenza alla compressione diminuiva con il numero dei cicli di carico. Liu et al. (2012) hanno studiato le influenze della pressione e della frequenza di confinamento sul comportamento a fatica delle rocce. Essi hanno scoperto che la deformazione assiale residua e la deformazione volumetrica residua aumentavano sia con la pressione di confinamento che con la frequenza e hanno proposto variabili di danno per descrivere il processo di degradazione dei campioni di arenaria in seguito a carico ciclico dinamico.

Le indagini su questo argomento sono ancora in corso per migliorare l'effetto di frantumazione della roccia nelle situazioni di scavo comuni all'ingegneria mineraria o per

quanto riguarda le tecnologie connesse con la tecnica dell'hydrofracking, per creare e poi propagare una frattura in uno strato roccioso nel sottosuolo al fine di migliorare la permeabilità dell'ammasso.

Le analisi riguardanti i comportamenti delle rocce sono tuttora molto eterogenee e le valutazioni connesse molte volte contraddittorie. La difficoltà generale sta proprio nella diversità delle prove condotte e negli obiettivi prefissati dallo specifico studio. Nonostante attualmente siano presenti una discreta quantità di elaborati tecnici riguardanti gli studi delle rocce sottoposte a carico ciclico, operare una classificazione ed un confronto tra di esse è tutt'altro che banale.

3. Classificazione della fatica

Lo scopo dei test ciclici è studiare la resistenza delle rocce a seguito dell'applicazione del carico ciclico ed eventualmente la sollecitazione in grado di provocare un certo effetto in un certo lasso di tempo. La misurazione della perdita di resistenza dovuta al carico ciclico comporta in questo modo l'esecuzione di molti test che richiedono altrettanto tempo.

Per quanto riguarda le prove cicliche possono esistere diverse classificazioni in base ai differenti parametri; in generale i più comuni sono le classificazioni in base alla frequenza, allo schema di carico, allo stato di sollecitazione e alla vita a fatica. Nei test ciclici i diversi parametri possono influenzare i risultati in misura maggiore o minore, e per questo diventa importante analizzarli nel dettaglio.

Prima di eseguire i test è necessario pianificarli e predisporli, andando a caratterizzare nel miglior modo possibile le prove in cui verranno esaminati i provini. Inoltre il tipo di materiale deve essere scelto correttamente, cosicché la roccia possa essere il più possibile omogenea e isotropa, in modo che i risultati siano i più accurati e utili per descrivere e calibrare i risultati finali.

Sono di seguito proposte le classificazioni dei principali parametri nello studio a fatica dei materiali.

3.1. Classificazione basata sulla frequenza

Nella loro vita meccanica i materiali resistenti sono sottoposti a sollecitazioni sia costanti, sia variabili nel tempo.

In base alle diverse frequenze di carico ciclico, la fatica può essere classificata come segue (Xu 2016):

- Alta frequenza (f > 10 Hz)
- Media frequenza (10 Hz > f > 0, 1 Hz)
- Bassa frequenza (f < 0, 1 Hz)
- Statica (carico costante)

Le prove più comuni sono quelle alla frequenza di 1 Hz.

3.2. Classificazione basata sul parametro di controllo

Considerando il sistema di controllo, lo studio del comportamento a fatica si svolge usualmente secondo due tipologie:

- Test con controllo del carico; il carico massimo e minimo per ogni ciclo rimane costante o va aumentando nel tempo secondo delle geometrie predefinite e ciò che varia è la deformazione assiale nel tempo. Il modulo elastico in generale rimane circa lo stesso durante tutti i cicli.
- Test con controllo della deformazione; test a deformazione costante con modulo elastico che si riduce gradualmente fino alla rottura.

In generale quindi una prova a fatica può essere eseguita con controllo di carico (stress) o controllo di spostamento (deformazione) ma ci sono anche prove che vengono utilizzate per ricerche specifiche dove si riscontra la dipendenza da molti parametri che ne caratterizzano l'andamento e i risultati.

Le tensioni massime e minime devono essere controllate perché di solito la tensione è il parametro che viene direttamente misurato.

3.3. Classificazione basata sull'applicazione del carico

In base alla modalità di applicazione del carico il comportamento a fatica può essere classificato come:

- Uniassiale, la più comune in natura e nei campi ingegneristici
- Multiassiale

Il carico nelle prove sui geomateriali viene solitamente applicato per compressione ma non mancano applicazioni nelle quali viene utilizzata la sollecitazione a trazione o la combinazione delle due.

3.4. Classificazione basata sulla vita a fatica

Sulla base del numero di cicli di carico che portano a rottura si può classificare il comportamento che porta a rottura per fatica in:

- Elevato numero di cicli (HCF)
- Basso numero di cicli (LCF)

Il limite tra le due classificazioni è 10^4 cicli. Quando si considera un alto numero di cicli non esiste un numero minimo di cicli da rispettare, ma la caratteristica che ogni ciclo deve garantire è quella di portare ad una deformazione plastica durante ogni ciclo.

Ad un basso numero di cicli normalmente corrisponde un maggior livello di carico.

3.5. Concetti di base sulla fatica

3.5.1. Carico dinamico e carico a fatica (ciclico)

I concetti di carico dinamico e carico di fatica non sono equivalenti, sebbene in taluni casi in letteratura essi vengano usati indistintamente, creando una certa ambiguità nella classificazione.

Il carico di fatica è caratterizzato da un carico σ dipendente dal tempo che viene applicato in modo ripetitivo, contrariamente al carico monotono dove il carico applicato σ o la deformazione ε sono in continuo aumento.

Per quanto concerne il carico dinamico, le forze inerziali generate all'interno del campione risultano decisamente maggiori rispetto alla forza di carico, mentre per carichi quasi statici le forze inerziali sono praticamente trascurabili. Lo studio del carico dinamico appartiene al campo delle scienze nelle quali si tratta di urti, cioè delle situazioni in cui si registra un aumento esponenziale delle forze in gioco. Se la velocità di applicazione del carico è molto alta durante gli esperimenti, le onde propagate e la loro sovrapposizione produce una distribuzione delle sollecitazioni diversa dalla situazione quasi statica.

Il segnale di carico ciclico è composto da un valore di carico medio, σ_{mean} (t), e da un certo carico applicato ciclico caratterizzato da un'ampiezza costante $\Delta\sigma$ (t, T), dove T è il periodo dell'onda di carico (Figura 3).



Figura 3: Segnale di carico ciclico

La frequenza di applicazione del carico è importante perché le alte frequenze sono solitamente correlate al carico dinamico.

L'onda di carico ciclico può avere forma diversa (Cerfontaine e Collin 2017) in base allo studio e alla macchina che si utilizza: gli andamenti più comuni dell'onda di carico sono quadrata, triangolare o sinusoidale. Il segnale sinusoidale è più vicino all'onda di sollecitazione generata, per esempio, durante i terremoti. È dimostrato su diversi materiali che la forma del segnale influisce sui risultati. Il segnale quadrato è il più dannoso, mentre le onde triangolari sono le meno dannose (Bagde Petros 2005, Erarslan et al. 2016).

Il valore di carico medio, σ_{mean} (t), e il carico applicato ciclico $\Delta \sigma$ (t, T) potrebbero essere costanti o modificabili. La maggior parte dei test trovati in letteratura considera ampiezze costanti o crescenti passo dopo passo come mostrato in Figura 4.



Figura 4: Tipico segnale a gradini

Un altro test tipico è quello con segnale a rampa, caratterizzato da un'ampiezza costante ma da una sollecitazione media crescente (Figura 5).



Figura 5: Segnale a rampa

La valutazione del controllo del danno si effettua mediante un test che adotta una sollecitazione media di ampiezza crescente (Figura 6). Esso è solitamente utilizzato all'inizio di una campagna di acquisizione dei dati per individuare la soglia limite di rottura del provino.



Figura 6: Test con controllo del danno

3.5.2. Modello di carico

Per condurre test ciclici, un parametro fondamentale è il tipo di carico ciclico applicato, che può essere suddiviso in termini di segno del carico agente:

- Da σ_{min} pari a zero al valore massimo σ_{max} e ritorno (il carico viene applicato a un valore massimo e successivamente viene completamente rimosso)
- Da σ_{min} positivo al valore massimo σ_{max} e ritorno (il carico agente non viene completamente rimosso)
- Da σ_{min} negativa (minima) al valore massimo σ_{max} (positivo) e ritorno (carichi completamente invertiti, tipici test di compressione-trazione)
- Da σ_{min} negativa (minima) al valore massimo σ_{max} (che rimane negativo) e ritorno (test di trazione).

3.6. Tipologie di prove a fatica

Le prove di laboratorio hanno lo scopo di generare una correlazione tra i parametri a cui fare riferimento come proprietà caratteristiche della roccia stessa. Queste proprietà singolarmente o congiuntamente considerate possano caratterizzare il comportamento nelle diverse condizioni in cui viene a trovarsi il materiale.

È quindi necessario definire la tipologia di test a cui possono essere sottoposti i campioni per capire quale può essere la miglior prova per indagare. Se infatti molte volte i parametri in uscita sono molto simili tra le diverse prove, è importante valutare nello specifico quale sia il problema ingegneristico in esame per poter scegliere al meglio. Per esempio nel caso di uno studio della superficie di rottura sarà necessario operare con una tipologia di test che in qualche modo riesca a garantire un'osservazione alla superficie inalterata del provino, senza il danno causato dall'attrito successivo al cedimento. Ciò può essere garantito mediante l'applicazione di carico ciclico di trazione.

È importante ricordare che nella degradazione dei materiali possono intervenire fattori di altra natura, per esempio agenti corrosivi e temperatura, che però non verranno trattati nello specifico.

3.6.1. Test di compressione a fatica

Il test di fatica a compressione si può dividere in test di compressione uniassiale (Figura 7) e triassiale. Il primo è un test comune e tipico soprattutto per le rocce e i materiali da costruzione, come suoli, asfalto e cemento.

Questo tipo di prova simula adeguatamente la condizione di stress effettiva delle strutture ingegneristiche sottoposte a carico unidimensionale; fanno parte di questo gruppo, per esempio, le fondazioni dei ponti o le pavimentazioni. Questa prova è di fondamentale interesse poiché permette di ottenere i diagrammi delle curve S-N senza grandi elaborazioni ed è per questo la più utilizzata.

La prova ciclica a compressione triassiale viene utilizzata nei casi in cui il materiale analizzato è solitamente sepolto in profondità nel sottosuolo (miniere, tunnel stradali o gallerie sotterranee).

In queste condizioni, la deformazione laterale del materiale è solitamente limitata e si sviluppa uno stato di sollecitazione triassiale pronunciato. Molti test di fatica triassiali su

materiali fragili (Liu et al.2011, Liu e He 2012; Ma et al. 2013; Jia et al. 2018; Zhao et al. 2018) documentano che con una maggiore pressione di confinamento la deformazione volumetrica cresce nel rapporto prima della rottura (Figura 8).



Figura 7: Schema di applicazione del carico mediante test a compressione uniassiale



Figura 8: test di compressione triassiale con pressione di confinamento differente: deformazione residua (%) a differenti pressioni di confinamento (Liu et al. 2011)

3.6.2. Test di trazione a fatica

La prova di fatica a trazione diretta, per quanto riguarda i geomateriali, non viene generalmente utilizzata a causa delle difficoltà nella preparazione dei campioni. Solamente negli ultimi anni i progressi della tecnica hanno permesso di effettuare con un miglior risultato alcune prove di fatica a trazione diretta (Reinhardt 1984, Fan et al. 2016, Chen et al. 2016). In questo test (Chen et al. 2016), due piastre di acciaio vengono
incollate alle estremità del provino da un adesivo strutturale. L'altra faccia della piastra è collegata al dispositivo di prova mediante cerniere sferiche e barre d'acciaio. Il dispositivo allunga le piastre e quindi la sollecitazione di trazione viene trasmessa direttamente al provino (Figura 9).



Figura 7: Schema macchinario per prova di trazione diretta utilizzata da Chen et al. (2016) con A-A' piano di simmetria.

Considerando le difficoltà con il funzionamento del dispositivo e la preparazione del campione nei test di fatica a trazione diretta (Figura 10 a sinistra), i metodi indiretti come il test brasiliano (Vicentini et al. 2014; Liu et al. 2018) sono tradizionalmente molto più usati per la comodità delle operazioni. Il metodo suggerito dall'ISRM propone di comprimere verticalmente un provino sottile di forma circolare in direzione diametrale(Figura 10 a destra). La rottura a trazione viene quindi indotta in questa maniera. Teoricamente, il cedimento a trazione dovrebbe iniziare nel punto centrale del provino, nella linea in cui è applicata la sollecitazione di trazione ed ha di conseguenza il valore massimo. Tuttavia, nei test di laboratorio, a volte la crepa inizia al contatto tra le piastre di caricamento e il campione a causa delle concentrazioni di sollecitazioni (Hudson et al. 1972; Swab et al. 2011). Sono stati compiuti alcuni sforzi per migliorare la modalità del test e garantire una ragionevole modalità di errore dei provini testati. Queste modifiche consistono nella modifica della forma del piano di carico (Li e Wong 2013), nella modifica dell'apparato o nella modifica della forma del provino nella prova brasiliana (Wang et al. 2004).



Problemi ingegneristici che possono essere affrontati:

- Travi

- Ponti

Figura 8: Schemi di applicazione del carico di trazione sul provino: a sinistra test di trazione diretta, a destra test di trazione brasiliano

3.6.3. Test di taglio a fatica

Le prove cicliche di taglio diretto vengono spesso eseguite su terreni o materiali argillosi (Boukpeti et al.2014; Kim et al.2015; Le e Ghayoomi 2017). Durante le prove viene solitamente applicata una sollecitazione verticale sul campione e lo sforzo di taglio ciclico può essere applicato alla parte superiore del provino, come si usa nelle normali prove a taglio (Figura 11), oppure è controllato dal movimento di un vassoio al di sotto del provino, che viene attivato da un attuatore pressurizzato idraulicamente. Oltre alle prove di taglio dirette cicliche su campioni intatti, può essere studiata anche la fatica a taglio ciclica di fratture planari o ruvide, che è più comune alla pratica ingegneristica (Jing et al. 1993, Dang et al. 2016, Fathi et al. 2016).



Problemi ingegneristici che possono essere affrontati:

- Instabilità di versanti
- Frane

Figura 9: Schema di applicazione di carico test di taglio a fatica

3.6.4. Test torsionale a fatica

In questi test la forza è applicata al campione tramite momenti flettenti (figura 12). Il campione ruota in modo che ogni superficie subisca sollecitazioni di trazione e compressione alternate. Questa tecnologia è molto comoda poiché permette di regolare molto bene il numero di cicli e il valore del carico. Inoltre la struttura del provino rotto non viene alterata dallo schiacciamento delle due metà. Come è intuibile però vi è un'intrinseca difficoltà di preparazione della prova nel caso di rocce e pertanto questo tipo di test viene solitamente utilizzato solo per i materiali metallici, a parte sporadici casi (Yassini et al. 2016).



Figura 10: Schema applicazione del carico nel test torsionale a fatica

3.6.5. Test di flessione a fatica

Nella prova di flessione, nota anche come prova di flessione a tre (figura 13) o quattro punti, il provino ha sempre una sezione trasversale semicircolare o rettangolare ed è ciclicamente piegato fino a quando compaiono fratture macroscopiche e si verifica un guasto.



Problemi ingegneristici che possono essere affrontati:

- Solette
- Pavimentazioni
- Piani di carico

Figura 11: Schema carico test di flessione a fatica

3.6.6. Test a fatica statica

La fatica statica è correlata alla "frattura ritardata", riferendosi al comportamento dipendente dal tempo sotto carico costante (Schmidtke e Lajtai 1985, Chen e Konietzky 2014, Xu et al. 2108). La fatica statica è associata alla tensocorrosione (degrado del materiale dovuto all'azione combinata di corrosione e applicazione di un carico costante) e al comportamento di scorrimento.



Figura 12: Diagramma tratto da Schmidtke e Lajtai (1985) che mostra la dipendenza del rapporto di sollecitazione rispetto alla durata della vita di un provino nella prova a fatica statica

Il diagramma in Figura 14, tratto da Schmidtke e Lajtai (1985), mostra il rapporto di sollecitazione (rapporto tra sollecitazione applicata e UCS) rispetto alla durata (durata fino al cedimento).

Lo schema di carico del test a fatica statica viene riportato per completezza in Figura 15.

Problemi ingegneristici che possono essere affrontati:

- Figura 13: Schema di carico test
- Dighe
- Serbatoi di gas e liquidi a grandi profondità

Figura 13: Schema di carico test a fatica statica

3.6.7. Test con cicli di congelamento-scongelamento

I test ciclici (fatica) di congelamento-scongelamento mirano a esplorare l'effetto delle variazioni di temperatura cicliche (nell'intorno di 0 °C) su materiali parzialmente o completamente saturi (Figura 16). L'acqua si espande fino a circa il 9% del suo volume originale quando congelata. Questa espansione induce sollecitazioni di trazione e danneggia la microstruttura della roccia, ampliando il proprio effetto durante ogni ciclo. Quando il materiale viene scongelato, l'acqua scorre attraverso le microfratture, condizione che va ad aumentarne il danno (Chen et al. 2004; Zhang et al. 2004; Grossi et al. 2007). Questi effetti sono di particolare importanza per i geomateriali nelle regioni fredde, come il suolo, le rocce e i calcestruzzi.

Durante le prove di congelamento-scongelamento, i campioni vengono conservati in contenitori a temperatura e umidità controllate subendo il cambio ciclico di temperatura. Rispetto alle prove di fatica meccanica, la durata di un ciclo nelle prove di fatica gelodisgelo è molto più lunga: un ciclo può durare fino a 12 ore e la prova in generale può protrarsi anche per giorni. Dopo il trattamento ciclico di congelamento-scongelamento seguono le prove meccaniche. Le ricerche principali su questo argomento sono state sviluppate da Qi et al. (2006) and Henry (2007), Jia (2015).



Problemi ingegneristici che possono essere affrontati:

Costruzioni in ambienti con clima rigido o instabile
Stabilità del permafrost

Figura 14: Grafico temperatura-tempo per prova a fatica con cicli di congelamento-scongelamento

3.6.8. Test ciclici di bagnatura-essiccazione

Questi test specifici mirano principalmente a indagare l'influenza del cambiamento ciclico del contenuto di acqua nei geomateriali. Il procedimento ricercato porta a modifiche delle proprietà, tra cui densità apparente, cambiamenti della massa, contenuto d'acqua, porosità effettiva e velocità delle onde P (Sumner and Loubser 2008; Ozbek 2014; Khanlari e Abdilor 2015; Xu et al. 2017). Un ciclo di bagnatura-essiccazione (Figura 17) è generalmente suddiviso in due fasi: saturazione (da stato secco a saturo) e asciugatura (da stato saturo a secco). In ogni ciclo, i campioni devono essere immersi in acqua o in altri fluidi per un dato tempo per raggiungere lo stato saturo a una temperatura costante, quindi sono estratti e essiccati all'aria alla stessa temperatura (Zhou et al. 2017). Dopo il trattamento ciclico di bagnatura-asciugatura, i campioni vengono sottoposti a test meccanici.



Problemi ingegneristici che possono essere affrontati:

- Rocce sottoposte a climi tropicali

Fondazioni stradali

Figura 15: Grafico Contenuto d'acqua-tempo per prova a fatica con cicli di bagnatura-essiccazione

3.7. Geometria dei provini sottoposti a test

I provini che vengono sottoposti a test di fatica a compressione hanno generalmente diametri compresi tra i 35 mm e 75 mm, con altezza doppia rispetto al diametro.

Per quanto riguarda le prove a trazione brasiliana, che sono le più comuni, i provini hanno generalmente diametro pari all'altezza.

4. Parametri che caratterizzano il comportamento a fatica delle rocce

Di seguito verranno confrontate ricerche teoriche e sperimentali riguardanti prove di carico ciclico che sono state eseguite per i tipi di rocce più comuni nell'ingegneria civile e ambientale, analizzando i diversi parametri che ne caratterizzano il comportamento a fatica.

In ultima istanza sarà dedicato un capitolo ad un confronto fra ricerche che hanno riportato dati confrontabili per la formulazione della curva di Wohler.

Le rocce specificatamente riportate nella ricerca sono di differente natura e genere, poiché l'obiettivo è quello di fornire una panoramica generale del comportamento a fatica: sono quindi analizzate rocce di tipo igneo come granodiorite, granito e gabbro, rocce metamorfiche quali marmo e scisto (in particolare sono importanti le considerazioni su quest'ultimo per la caratteristica anisotropia) e sedimentarie (in particolare arenaria, calcare e salgemma).

Il tipo e la struttura delle rocce giocano un ruolo significativo nel loro comportamento a deformazione nei diversi scenari di carico. Le rocce sedimentarie come l'arenaria, soprattutto nei casi di scarsa cementazione, sono altamente porose, generalmente omogenee e mostrano deformazioni e risposte di cedimento diverse rispetto alle rocce compatte come il granito, che ha la caratteristica di avere tessitura granulare di varie dimensioni e senza porosità iniziale.

La vita a fatica è determinata dal processo di propagazione delle cricche, che è influenzato dalle proprietà del materiale (<u>tipo di roccia, storia geologica, qualità della superficie,</u> <u>dimensioni e distribuzione dei difetti interni, granulometria e geometria</u>) e dal regime di carico applicato (<u>ampiezza della sollecitazione, sollecitazione massima e media,</u> <u>numero di cicli di carico, spettro d'onda del carico</u>).

Ognuna delle variabili sopraelencate rende la previsione della vita a fatica sotto carico di ampiezza variabile più complessa rispetto al carico di ampiezza costante.

Il cedimento per fatica si può verificare all'occorrenza di una delle tre condizioni seguenti (Bagde e Petros 2005, Jamali 2017):

- un valore sufficientemente alto della sollecitazione massima (stress limite superiore o inferiore)
- una variazione o fluttuazione sufficientemente grande della sollecitazione applicata (ampiezza della sollecitazione)
- un numero sufficientemente elevato di cicli dello stress

A queste occorre aggiungere alcune considerazioni riguardanti anche la morfologia della roccia.

4.1. Sollecitazione massima:

Essa ha un'influenza importante sulla vita a fatica.

Esiste una <u>soglia di resistenza alla fatica</u> (Ge e Lu 1992, Feng et al., Wu, Ding et al.) alla quale la roccia può sostenere il carico e lo scarico per un numero indefinito di cicli senza cedimento: per ogni geomateriale questa resistenza è definita come la tensione massima alla quale una roccia può essere caricata ciclicamente per un gran numero di cicli senza cedimenti (Schijve 2008, Vutukiri et al. 1978).

Questo limite viene indicato sperimentalmente come 10^6 cicli (Jamami) ma si tratta di un valore che non può essere considerato in assoluto come veritiero poiché esistono ricerche nelle quali tale limite viene superato ed il provino ha in un secondo momento ceduto (Cardu 1988, Rajaram, Geranmayeh 2019). La relativa durata a fatica del campione non è stata perciò infinita per quel livello di sollecitazione come era lecito aspettarsi.

I limiti di resistenza per tutti i tipi di rocce sono compresi tra il 40% e il 60% della loro resistenza alla trazione che è in accordo con il risultato presentato per la fatica di altri materiali (Lee e Barr 2004, Campbell e Cheng 1981). Non mancano comunque anomalie a questa soglia, che fanno registrare valori fino all'80-90% del della resistenza a compressione uniassiale, forse anche da ricercarsi nella errata valutazione di quest'ultima.

I valori di sollecitazione limite a fatica potrebbero essere un buon punto di partenza nella progettazione ingegneristica, in mancanza di prove sperimentali utili a gestire le problematiche derivanti da carichi ciclici.

Si può concludere che ogni materiale roccioso ha una soglia di resistenza, denominata resistenza alla fatica; la roccia cederà a un basso numero di cicli quando il livello di sollecitazione massimo è superiore a questa soglia, se altre condizioni di prova rimangono

costanti. Il livello massimo di sollecitazione applicata è di grande importanza nella valutazione dei parametri meccanici delle rocce e nella progettazione di qualsiasi struttura che verrà utilizzata in condizioni di carico ciclico.

4.2. Tipo di roccia

È appurato che rocce dure (UCS maggiore) posseggano una soglia di resistenza a fatica superiore rispetto alle rocce tenere; quando però si confronta il rapporto tra il valore della massima resistenza a compressione monoassiale e il valore della resistenza a sollecitazione a carico ciclico con il numero di cicli prima della rottura, ossia la curva di Wohler, si nota che materiali teneri e duttili sopportano con migliori risultati la fatica (figura 18).



Figura 16: Confronto vita a fatica mediante grafico S – N per due rocce con litologia differente

In larga misura, la duttilità e la fragilità dipendono dalle caratteristiche intrinseche dei materiali, come la composizione meccanica e la microstruttura (Brown 1974).

Badge e Petros (2005) riportano che materiali diversi mostrano risposte diverse quando sono soggetti a carico ciclico: alcuni materiali diventano più forti e più duttili, mentre altri diventano più deboli e più fragili.

Si può presumere che le rocce dure siano più suscettibili al carico ciclico rispetto alle rocce tenere, e che la degradazione delle loro caratteristiche geomeccaniche sotto carico ciclico sia più pronunciata (Geranmayeh 2018, Vaneghi et al.2018).

È stato rilevato che la fatica delle rocce produce crepe intergranulari attorno ai bordi dei grani rompendo i legami tra i grani e la matrice rocciosa. Il meccanismo di rottura è costituito dagli sforzi di taglio correlati allo scorrimento tra i grani e la matrice rocciosa durante ogni ciclo. Questo processo può avvenire più facilmente in rocce a grana grossa, con una composizione mineralogica varia e alterate (Jamali 2017, Erarslan 2014) poiché in una roccia cristallina costituita da diversi minerali, le componenti più deboli controllano il comportamento generale a fatica, avendo migliore capacità di resistenza alle sollecitazioni applicate dal carico ciclico.

4.3. Ampiezza del carico

L'ampiezza è un fattore chiave nell'analisi del carico ciclico, in quanto è un indicatore di quanto le tensioni massime e minime variano dalla sollecitazione media, e inoltre determina i valori attesi della sollecitazione massima raggiunta. Il danneggiamento si sviluppa più rapidamente ad un livello maggiore di ampiezza del carico (Singh 2007, Taheri 2016, Gong e Smith 2003, He et al. 2018). Maggiore è l'ampiezza del ciclo, minore sarà la vita a fatica.

L'importanza dell'ampiezza del carico è stata anche dichiarata da Attewell e Farmer (1973) quando hanno confrontato la risposta ciclica delle rocce sotto diverse ampiezze e frequenze di carico. Essi ritenevano che il cedimento si verificasse più facilmente per sollecitazioni dinamiche a bassa frequenza con ampiezza maggiore rispetto a quelle ad alta frequenza con ampiezza minore.

La loro teoria è stata confermata successivamente (Singh 2007, Erarslan 2014, Thaeri 2016, Geranmayeh et al. 2018, He 2018) verificando mediante alcune prove sperimentali (Figura 19) che la degradazione della resistenza della roccia caricata a un livello di sollecitazione basso con un'ampiezza di ciclo elevata è maggiore rispetto a quando è

caricata a un livello di sollecitazione più elevato con un'ampiezza di ciclo inferiore, avendo portato a cedimento in minor tempo i provini sotto esame.

Vanenghi (2020) suggerisce addirittura che l'effetto dell'ampiezza del carico è più forte di quello del livello di sollecitazione massimo. Questa considerazione, tuttavia, deve essere convalidata con ulteriori dati sperimentali su altre rocce.



Figura 17 Tendenza della diminuzione della vita a fatica dei provini di arenaria in relazione all'aumento dell'ampiezza di carico Singh He et al. (2016) Taheri et al. (2016). I campioni di arenaria sono stati caricati per più di 100 cicli con un'ampiezza di carico di 40 MPa, mentre sono giunti a rottura subito dopo 2 cicli quando l'ampiezza di carico è aumentata a 47 MPa (Taheri et al., 2016)

Non è però ancora del tutto chiara la dipendenza della resistenza a fatica sulla frequenza di carico, o perlomeno non si conosce una legge universalmente valida.

4.4. Effetto della frequenza di carico

Secondo alcuni ricercatori non esisterebbe una chiara tendenza che colleghi la frequenza di carico alla resistenza a fatica e alla vita a fatica ad alte frequenze di carico (Ishizuka et al. 1993, Bagde e Petros 2005, He et al. 2018).

Geranmayeh et al. (2018) hanno attribuito una relazione diretta tra la frequenza di carico, la resistenza a fatica e la durata a fatica alle basse frequenze (di solito inferiori a 1 Hz). Il risultato dei loro studi mostra che la durata dei provini sottoposti a fatica aumenta con la frequenza del carico: è stato dimostrato che un aumento della resistenza al cedimento di questi campioni si ha con il relativo aumento della frequenza di caricamento (Figura 20).



Figura 18 confronto della deformazione residua in relazione al numero di cicli e frequenza per i provini di granodiorite e arenaria (Geranmayeh et al.2018)

Essi hanno quindi concluso che l'evoluzione del danno e della deformazione del provino in generale durante il caricamento ciclico diventa più lenta a frequenze di carico più elevate. In altre parole, le microfessure non hanno tempo sufficiente per propagarsi a frequenze di caricamento più elevate. Al contrario, le microfessure possono svilupparsi più facilmente a basse frequenze poiché il carico viene applicato lentamente e c'è tempo sufficiente per la nucleazione di nuove microfessure e la propagazione e ramificazione delle crepe esistenti (una sorta di tensocorrosione). Questo potrebbe anche spiegare perché i campioni caricati a frequenze di carico più elevate hanno sostenuto maggiori deformazioni assiali e laterali finali. Tale risultato potrebbe essere un altro riflesso del comportamento duttile di una roccia tenera e del comportamento fragile di una roccia dura.

4.5. Modello di svolgimento della prova

Lo scopo dell'esecuzione di due tipi di carico ciclico era quello di individuare il tipo di carico ciclico più dannoso utilizzando le stesse ampiezze.

Geranmayeh e Ferdosi (2018) propone uno studio di due rocce (arenaria e granodiorite) sottoposte a prove a frequenza costante ma con ampiezza e livello di sollecitazione variabili. In questi test ciclici uniassiali sono stati considerati due tipi di carichi ciclici:

- livello di stress medio costante o il carico ciclico costante (CCL, per esaminare gli effetti dell'ampiezza del carico e del livello massimo di sollecitazione sulla resistenza alla fatica).
- livello di stress medio crescente o il carico ciclico a gradini (SCL, l'ampiezza del carico è stata mantenuta costante mentre il livello di stress massimo è stato aumentato gradualmente).

Questi test sono stati ideati per trovare lo stress a fatica delle rocce testate e per esplorare l'effetto del livello di stress massimo sulla resistenza a fatica fino a rottura. Il percorso di carico ciclico rispetto al tempo è illustrato schematicamente in Figura 21.



Figura 19 schema di carico CCL e SCL a confronto, Geranmayeh e Ferdosi (2018)

I test del livello di stress medio crescente (percorso SCL) forniscono una modalità di esplorazione dell'effetto della cronologia del carico sul loro comportamento a fatica.

Erarslan et al (2014) invece nello studio utilizzano due diversi tipi di carico ciclico nella prova a trazione in questo caso (Figura 22): carico ciclico con livello medio costante e ampiezza costante (carico ciclico sinusoidale) e carico ciclico con livello medio crescente

e ampiezza costante (carico ciclico crescente). Questa ricerca è una delle poche che contiene informazioni riguardanti provini sottoposti a sollecitazione ciclica a trazione.



Figura 20 confronto tra gli spettri di carico (Erarslan et al., 2014)

Le ampiezze di carico sono costanti in entrambi i tipi di carico ciclico. Tuttavia, il livello medio di ogni ciclo aumenta a una velocità costante nelle prove di carico ciclico crescenti, mentre il livello medio di ogni ciclo è costante nelle prove di carico ciclico sinusoidale.

Le osservazioni sperimentali dei test di carico ciclico hanno indicato che il carico ciclico crescente sembra avere un effetto maggiore sulla degradazione delle rocce rispetto al carico ciclico sinusoidale. La riduzione della tenacità alla frattura è infatti risultata essere pari al 29% nei test di carico sinusoidale, mentre l'aumento del carico ciclico ha causato una riduzione della tenacità alla frattura fino a un massimo del 46% (valori in media).

4.6. Crepe e rottura iniziale

I processi di danneggiamento dei materiali fragili sono guidati dalla distribuzione delle microfessure e dalla loro evoluzione. La nucleazione e la crescita delle microfessure influiscono in modo significativo sull'evoluzione del danno e di conseguenza sul comportamento macroscopico dei materiali.

Per comprendere come fratture e difetti iniziali influenzino il comportamento a fatica e l'evoluzione del danno da fatica di rocce con difetti preesistenti è importante ed a tal fine è necessario lo studio di rocce prefessurate sotto carico di fatica. Il comportamento meccanico di campioni di roccia fessurata soggetti al carico ciclico è stato testato in alcuni campioni simili a rocce con difetti preesistenti a diversi angoli di inclinazione (Figura 23), da 0° a 90°, e si è scoperto che il campione con un angolo di inclinazione a 45° ha una vita a fatica minima rispetto agli altri angoli di inclinazione (Chen et al. 2014, Li et al. 2018).



Figura 21 esempio di campioni con fessura indotta (Li et al. 2018)

Per quanto riguarda il tempo di sviluppo delle cricche è stato osservato che quando il livello di carico massimo è basso (maggiore del limite di fatica) il processo di inizio della cricca occupa gran parte dell'intera vita a fatica mentre ad alte sollecitazioni la crescita della cricca è molto più rapida.

Inoltre l'effetto dei carichi ciclici precedenti sullo sviluppo delle cricche si fa sentire maggiormente e produce crepe meglio visibili nelle rocce più uniformi (Geranmayeh e Ferdosi 2020).

4.7. Caratteristiche dell'ammasso roccioso

Per le rocce con comportamento anisotropo la giacitura dei piani di scistosità gioca un ruolo molto importante nelle caratteristiche di resistenza a carico ciclico (Guo et al. 2017). Lo scopo della ricerca di Guo è stato quello di verificare la differenza nel meccanismo di deformazione tra rocce omogenee e rocce anisotrope. L'angolo tra la direzione di carico e la giacitura dei piani di scistosità ha un'influenza importante sulle proprietà meccaniche e sulle modalità di rottura della roccia stratificata (Figura 24).

C'è una grande differenza nel meccanismo di deformazione tra rocce omogenee e rocce stratificate (Li et al. 2018).



Figura 22 Relazione tra deformazione assiale e numero di cicli a rottura sotto carico ciclico a diversi carichi per (a) provini con scistosità parallela al carico, (b) provini con scistosità perpendicolare al carico (Guo et al. 2017)

4.8. Frammentazione

Griffith 1921 fu il primo a descrivere l'importanza di difetti o microfessure (in questo caso preesistenti nella roccia) sulla riduzione della resistenza di un materiale e nella misurazione della sua imperfezione: secondo Griffith i solidi fragili falliscono per propagazione incrementale di una moltitudine di piccole crepe preesistenti orientate in modo casuale. Queste crepe sono comuni nelle rocce che contengono microfessure sia intragranulari (all'esterno nel bordo del grano) che intergranulari (all'interno nel grano) e crepe multiple macroscopiche o transgranulari più grandi. Il meccanismo di rottura dipenderebbe quindi dalla microstruttura della roccia in esame.

La microfessurazione è quindi la causa principale del cedimento per fatica (Vanenghi et al. 2018, Erarslan 2012).

Tuttavia, la natura e le modalità di cedimento nella roccia sottoposta a carico ciclico rimangono poco chiare; sono infatti numerosi gli autori che affermano di riscontrare una tipologia di rottura diversa in base alla tipologia di carico ciclico/monotono (Burdine 1963, Carfagni e Salvatore 2000, Guo et al. 2017, Taheri et al. 2016), anche se altri affermano di non notare discrepanze nell'osservazione dei provini una volta fratturati (Cardu 1988, Xiao J. Q. et al. 2010).

La differenza si è osservata nella maggiore frammentazione e polverizzazione della roccia, imputata principalmente all'abrasione locale dei grani (Vanenghi et al. 2018).

Nelle ricerche in cui venivano raccolte informazioni derivanti da più rocce con caratteristiche meccaniche differenti si è potuto notare come, con la crescita della durezza

della roccia, il cedimento era più netto quando i provini erano sottoposti a carichi statici rispetto a quelli ciclici.

La tesi sostenuta è che verosimilmente il tipo di rottura dipenda dalle caratteristiche di fragilità della roccia in esame: infatti si può notare come gli autori che affermavano di avere riscontrato differenze tra i meccanismi di rottura abbiano condotto ricerche su rocce con durezza maggiore (granodioriti e scisti) rispetto a chi non rilevava discrepanze tra le fratture (Calcari e arenarie).

Un'altra possibile spiegazione di questa differenza è che il carico ciclico a bassa frequenza consente l'inizio, la nucleazione e la localizzazione di cricche di trazione che crescono parallelamente all'asse di carico durante le fasi di carico-scarico lente; sotto carico monotono e carico ciclico ad alta frequenza, le fessure di trazione non hanno tempo sufficiente per lo sviluppo e la propagazione e il cedimento finale si verifica lungo due piani di taglio che si uniscono nella zona centrale del campione (Vanenghi et al. 2020). Per quanto riguarda la fratturazione ciclica a bassa frequenza, questa permette lo sviluppo di microfessure che, propagandosi fino a intersecarsi, vanno a creare una rete di fratture.

La rugosità delle superfici di rottura è influenzata dai tipi di carico e dalla fragilità della roccia. Nejati et al. (2013) indagando sulla morfologia delle superfici di rottura descrivono come queste soggette a carico ciclico erano più ruvide di quelle soggette a carico statico e la roccia poco fragile mostrava una superficie di rottura più liscia rispetto alla roccia altamente fragile.

La resistenza alla fatica delle rocce dure/fragili sembra essere inferiore a quella delle rocce tenere/duttili. Quanto più fragile è la roccia, tanto maggiore è della forza e minore è la resistenza alla fatica (Vanenghi e Ferdosi 2020).

Anche nel caso di piani di scistosità, Guo et al (2017) hanno compiuto studi riguardanti la differente modalità di rottura in una roccia trasversalmente anisotropa, prelevando provini dalla roccia con carotaggi verticali e orizzontali, in modo tale da avere i piani di scistosità lungo la verticale e trasversalmente ad essa. Nel caso in cui il carico venga applicato parallelamente alla direzione di giacitura dei piani, la modalità di rottura principale sarà per trazione: le microfessure hanno avuto tempo sufficiente per svilupparsi, diffondersi e fondersi durante l'applicazione del carico ciclico portando a una rete di fratture. I campioni con applicazione del carico trasversale hanno invece formato una serie di piani di scistosità collassati durante la prova (Figura 25).



Figura 23 Tipico aspetto di provini scistosi dopo l'applicazione del carico ciclico. (a) carico parallelo al piano di scistosità (b) carico perpendicolare al piano di scistosità, Guo et al (2017)

Secondo Erarslan et al. (2012) il numero di frammenti prodotti è molto maggiore sotto carico ciclico rispetto al carico statico: nel primo caso si formerebbero molte microfratture interagenti tra loro, mentre nel secondo caso si avrebbero rotture nette e lisce lungo i piani di rottura.

Questa caratteristica la si può notare bene nella Figura 26 essendo i provini sottoposti a carico di trazione indiretta (brasiliana) con tacca. Nella immagine (a) si possono notare i provini sottoposti a trazione monoassiale con una frattura netta, mentre in (b) sono molto più visibili le irregolarità nella rottura.

Si ricorda inoltre che in questo caso i provini sono considerati relativamente teneri, essendo composti da arenaria. La particolarità del test a trazione è che permette di avere una superficie sul piano di rottura non alterata, al contrario delle prove a compressione dove, una volta che il provino ha ceduto, vi è una continua applicazione del carico che può portare ad un deterioramento della rete di fratture e asperità venutesi a creare.



Figura 24 provini di tufo in esame: (a) provini sottoposti a trazione monoassiale (b) provini sottoposti a sforzi di trazione ciclici (Erarslan et al. 2012)

Per quanto riguarda la fratturazione nei casi particolari come cicli di gelo e disgelo, si osserva una completa perdita delle caratteristiche del materiale, che va di conseguenza a sgretolarsi sotto il peso proprio.

Le Figure 27 e 28 (Nejati 2013) riportano invece le differenze tra i cedimenti a fatica ciclica e monotona in campioni di marmo, arenaria e calcare, valutati mediante la tomografia: ciò può dare un'idea di come sia diversa la rottura in campioni di roccia con differente durezza. Si nota come la rottura per l'arenaria, ma soprattutto per il marmo, sia differente nel caso di prova ciclica o statica.



Figura 25 Superfici di campioni testati: (a) marmo, (b) arenaria (c) calcare (Nejati 2013).



Figura 26 Superficie di rottura analizzata mediante la tomografia: (a) marmo sotto carico statico, (b) marmo sotto carico dinamico, (c) arenaria sotto carico statico, (d) arenaria sotto carico dinamico, (e) calcare sotto carico statico, (f) calcare sotto carico dinamico (Nejati 2013).

Geranmayeh e Ferdosi 2017 osservano la formazione di più crepe localizzate dopo prove di carico ciclico rispetto a quelle di carico statico. Gli autori concludono che la resistenza alla fatica della roccia nei due differenti casi (Figura 29) è stata influenzata principalmente dal contenuto di quarzo, dalla consistenza e dalla struttura della roccia nel carico ciclico dinamico.



Figura 27 Provini di arenaria e granodiorite sottoposti a carico monotono (a) e carico ciclico (b) (Geranmayeh e Ferdosi 2017)

4.9. Effetto della temperatura

Un'applicazione ben nota della teoria della fatica nello studio degli agenti atmosferici delle rocce è la fatica termica. Diversi studi precedenti (Aires et al. 1975, Hall et al. 1999) hanno illustrato l'effetto della fatica termica durante l'erosione delle rocce a freddo e a caldo. Il frequente e rapido cambiamento della temperatura in alcune particolari regioni può portare alla frantumazione della porzione più esterna di rocce intatte e dure.

I risultati della degradazione delle proprietà meccaniche dopo ripetuti cicli di congelamento-scongelamento sono raccolti da Jia et al. (2019) che studiano l'effetto di questo fenomeno. L'azione ripetuta del gelo può essere considerata come un carico a fatica, la cui entità cambia al variare delle condizioni ambientali. Questo tipo di degradazione si ha infatti principalmente in zone dove le differenze di temperature sono molto ampie, arrivando anche al di sotto di 0 °C. Sono state svolte prove a ciclo lento per la particolarità della prova stessa, con provini ricavati da rocce con comportamento trasversalmente anisotropo.

La deformazione perpendicolare e parallela al piano di giacitura durante la fase di raffreddamento consiste in tre fasi: contrazione iniziale, dilatazione lenta e dilatazione rapida. la deformazione residua irreversibile si manifesta principalmente nella direzione perpendicolare.

L'espansione volumetrica spesso non distrugge i campioni di arenaria in un ciclo, ma può generare danni significativi. La deformazione residua e l'aumento della porosità sono chiari segni di danneggiamento. Il modello di accumulo del danno (ossia l'affaticamento della roccia) può essere ben riconosciuto una volta che il campione si è scongelato ed appare una deformazione residua data dall'aumento della porosità nel corso di ripetuti cicli di gelo-disgelo.

Sia la resistenza a compressione uniassiale (UCS) che il modulo elastico a compressione diminuiscono linearmente all'aumentare del numero di cicli di gelo-disgelo: L'UTS e il modulo elastico a trazione diminuiscono rapidamente all'inizio e poi lentamente nei cicli successivi, in accordo con l'andamento della porosità efficace. La diminuzione dell'UCS (35%) è minore della diminuzione dell'UTS (95%): infatti alla fine della prova si osserva la quasi completa scomparsa della resistenza alla trazione (Figura 30).



Figura 28 Diminuzione della UCS e UTS al crescere del numero di cicli di gelo-disgelo (Jia et al. 2013)

La completa scomparsa della resistenza a trazione dell'arenaria dopo 17 cicli di gelodisgelo conferma l'esistenza di "affaticamento da gelo". Sebbene possa sembrare che il danno e la fatica accumulati possano essere rilevanti solo per cicli efficaci con alti valori di saturazione dell'acqua (Jia et al. 2013) l'effetto di questo particolare tipo di fatica è dimostrato anche a livelli più bassi di saturazione con un numero maggiore di cicli (Matsuoka 2008, Ruedrich et al. 2011).

4.10. Misurazioni alternative sperimentali

È stato scoperto che la propagazione del danno indotto nelle rocce a seguito di processi di fatica può essere valutata anche mediante misurazioni ultrasoniche (Vanenghi et al. 2017).

Negli ultimi decenni, la tecnica dell'emissione acustica (AE) è stata ampiamente adottata, come eccellente strumento diagnostico, per monitorare i danni da frattura dei geomateriali (Young e Martin 1993, Moore e Lockner 1995, Zietlow e Labuz 1998, Nasseri et al. 2006, Aggelis et al. 2011, Shah e Kishen 2012). Per monitorare il processo di propagazione

della frattura si impiegano sensori di emissione acustica (AE). I test sperimentali hanno indicato che la fragilità influenza fortemente l'evoluzione del danno a seguito dell'applicazione di cicli di carico statico e dinamico. Il monitoraggio dell'emissione acustica (Figura 31) ha rivelato che la densità delle microcricche indotta dai carichi applicati durante le diverse fasi dei processi di rottura aumenta con l'aumentare della fragilità della roccia. Mediante lo studio acustico è stato possibile affermare che la roccia con il maggior numero di microfessure indotte durante i cicli di carico ha vita a fatica minore (Nejati et al. 2014).



Figura 29 Diagramma che rappresenta il danno a fatica misurato mediante l'emissione acustica

La tomografia computazionale è stata usata in alcuni casi come tecnica non distruttiva per esaminare i provini e controllare lo sviluppo delle microcricche al loro interno (Geranmayeh 2020) con buoni risultati.

La ricerca riguardante la risposta delle rocce al carico ciclico di trazione è molto limitata: il comportamento a fatica sotto l'azione di tale tipologia di carico è però di rilevanza fondamentale per la letteratura essendo la roccia in generale molto meno resistente a trazione che a compressione. Un particolare studio del comportamento a fatica delle rocce sotto carico ciclico di trazione indiretta è stato svolto mediante prova brasiliana su campioni intagliati su un solo bordo (CCNBD); questo intaglio lungo tutto il provino forniva il punto preferenziale dove la sollecitazione veniva applicata (Erarslan e Williams 2012), per cui la rottura si verificava molto spesso lungo quell'asse.

5. Ricerche analizzate

Nel seguito si riportano i risultati di alcune ricerche delle quali è stato possibile reperire i dati per proporre un confronto eterogeneo ed esaustivo fra le prove cicliche eseguite.

5.1. Autori e tipologie di rocce analizzate

Sono stati considerati dati di più autori per fornire una panoramica circa le convenzionali prove di carico ciclico a cui possono essere sottoposte le rocce. La particolarità di ciò è che le ricerche, a parte la prima svolta da Cardu (1988), sono tutte molto recenti, il che evidenzia la notevole crescita di interesse per l'argomento negli ultimi dieci anni.

Autore	Anno	Tipo di roccia	Provenienza
	pubblicazione		
Cardu	1988	Calcare	Masua Sardegna
Erarslan	2012	Tufo	Brisbane
williams			
Nejati	2013	Cacare, arenaria, marmo	Iran
Jia et al.	2015	Arenaria	Yichang, provincia di
			Hubei, Cina
Jamali et al.	2017	Gabbro, marmo, calcare	Iran
Geranmayeh	2018	Granodiorite e arenaria	Gosford, New South
Ferdosi et al.			Wales, Australia
Guo et al.	2018	Scisti (composizione	Longmaxi, Nanchuan,
		quarzo, minerali argillosi	Chongqing, Cina
		e feldspato)	
Geranmayeh	2020	Granodiorite e arenaria	New South Wales,
Thoeni et al.			Australia

Tabella 1: Autori riportati e tipi di rocce analizzate

Autore	Apparecchiatura	Tipo di prova	
Cardu		Compressione ciclica	
	pressa servocontrollata MTS	monoassiale	
Erarslan	servo-controllo idraulico a cella di		
Williams	carico Instron 6027	trazione indiretta CCNBD	
Nejati	macchina di prova servoelettrica	trazione indiretta	
Jia et al.		congelamento-	
	-	scongelamento	
Jamali et al.		macchina a raggio rotante	
	-	(RR Moore)	
Geranmayeh	pressa servocontrollata GCTS UTC-	Compressione ciclica	
Ferdosi et al.	1000	monoassiale	
Guo et al.		Compressione ciclica	
		monoassiale con due	
	pressa servocontrollata	principali orientazioni di	
	elettroidraulica RMT-150C	carico	
Geranmayeh	pressa servocontrollata GCTS UTC-	Compressione ciclica	
Thoeni et al.	1000	monoassiale	

5.2. Apparecchiature utilizzate per le prove e modalità di prova

Tabella 2: Apparecchiature utilizzate e Tipi di prova connessi

Lo scopo preliminare delle prove era quello di ricavare curve sforzo-deformazione complete e determinare la resistenza media dei provini, ottenendo così dati essenziali per le successive prove di carico ciclico.

Come riportato in tabella 2, le prove sono state effettuate con attrezzature differenti ma principalmente consistenti in presse servocontrollate che possono operare in trazione e compressione. Circa la risposta del comportamento a trazione delle rocce sotto carico ciclico, le ricerche condotte sono peraltro più limitate.

Vi è inoltre un apparato, basato su una macchina per prove di fatica a raggio rotante (RRMoore), che è comunemente usato per prove in laboratorio sui metalli. In questo apparecchio la condizione di carico completamente invertito può essere introdotta combinando pura flessione e rotazione, ma la difficoltà sta nella natura della roccia molto

meno idonea a sopportare carichi di questo tipo: molti provini hanno subito dei danneggiamenti alle estremità o all'interno della capsula di contenimento.



Figura 30: tipico provino inserito nelle capsule di contenimento per prova con macchina a raggio rotante RR Moore (Jamali et al. 2017)

Una particolare modalità di prova è stata quella riportata da Jia et al. (2015) consistente nell'applicazione di cicli di gelo e disgelo. I campioni sono stati posti in una camera ambientale, la cui temperatura iniziale è stata mantenuta a 25° C. La camera è stata quindi raffreddata a -10 °C entro 30 minuti e mantenuta a questa temperatura per 12 ore. I campioni sono stati quindi nuovamente riscaldati a 25°C e ciclicamente si è ripetuta la medesima procedura.

5.3. Materiale sperimentale

Sono state seguite le normative suggerite dalla International Society for Rock Mechanics (ISRM) per la preparazione dei provini. Il corretto svolgimento della prova è stato garantito da campioni scelti senza difetti.

Per quanto riguarda la dimensione dei provini, nella maggioranza dei casi in cui sono state effettuate prove di compressione ciclica monoassiale o triassiale, il rapporto tra altezza e diametro è stato mantenuto pari a 2 (Tabella 3).

Nei casi particolari di trazione brasiliana il rapporto fra raggio e altezza del provino è pari a 1.

Nel caso della macchina a raggio rotante, l'altezza è stata mantenuta pari a 10 volte il diametro, comportando qualche problema nella gestione della prova, essendosi verificate più volte rotture alle estremità dei provini.

Autore	diametro e altezza dei provini
Cardu	55-71, 140
Erarslan williams	26, 26
Nejati	54, 45
Jia Krautblatter	50, 100
Jamali	11, 120
Geranmayeh Ferdosi et al.	54-42, 131-102
Guo et al.	50, 100
Geranmayeh Ferdosi et al.	42, 100

Tabella 3: Misure di diametro e altezza dei provini

5.4. Prove non distruttive sui provini

Prima della prova di fatica, la velocità delle onde P è stata misurata in molte ricerche sperimentali (Tabella 4) come indice per valutare la dispersione delle proprietà fisiche (Figura 33).

Autore	Tipo di roccia	Diametro	Velocità onde P (m/s)
		provino (mm)	
Cardu	Calcare	55	6176
	Calcare	71	5924
Erarslan williams	Tufo	26	-
Nejati	Marmo	54	-
	Arenaria	54	-
	Calcare	54	-
Jia Krautblatter	Arenaria	50	2650
jamami	Gabbro	12	-
	Marmo verde	12	-
	Calcare	12	-
Geranmayeh	Arenaria	42	-
Ferdosi et al.	Arenaria	54	-
	Granodiorite	42	-
	Granodiorite	54	-

Guo et al.	Scisto (orientazione piani paralleli)	50	4306
	Scisto (orientazione piani trasversali)	50	4667
Geranmayeh	Arenaria	42	2403
Thoeni et al.	Granodiorite	42	4348

Tabella 4: Valori del diametro provini e velocità delle onde P

Si è riscontrato che il modulo di Young medio varia nello stesso modo al variare della frequenza e dell'ampiezza del carico (Badge e Petros 2005, Vanenghi e Ferdosi 2017).



Figura 31: Velocità delle onde-P registrata per provini di granodiorite (a) e arenaria (b) prima del carico e dopo gli step di carico (Geranmayeh 2020)

5.5. Prove distruttive sui provini

Di fondamentale importanza è stata l'iniziale valutazione della resistenza delle rocce, necessaria per la rappresentazione della curva di Wohler. Scopo di queste prove è ottenere la resistenza media a cui riferire le sollecitazioni massime nei cicli di fatica ed il limite a fatica.

Sono stati destinati alcuni provini, selezionati in base all'esame macroscopico ed ai valori rilevati nelle prove non distruttive, per le prove meccaniche distruttive necessarie a definire i valori medi ed i campi di variazione delle caratteristiche elastiche e di resistenza del materiale in studio. In tutti i casi di letteratura raccolti, i provini erano sottoposti al test di compressione uniassiale, e in molti casi i provini delle stesse rocce erano anche sottoposti a test di trazione uniassiale in modo da avere due riferimenti rispetto al materiale in esame.

Le determinazioni di resistenza a compressione possono essere effettuate secondo due modalità:

- Con la velocità di applicazione del carico stabilita dalle norme ISRM (norme per brevità indicate come "statiche");
- Con la velocità di applicazione del carico il più simile possibile a quella da utilizzare nelle prove di fatica.

Autore	Tipo di	Diametro	UCS medio	UTS medio
	roccia	provino (mm)	(MPa)	(MPa)
Cardu	Calcare	55	73.5	-
	Calcare	71	101	-
Erarslan	Tufo	26	97	8
Williams				
Nejati	Marmo	54	81	9.5 ma con ccbdk 4.5
	Arenaria	54	126	10
	Calcare	54	31	3.5
Jia Krautblatter	Arenaria	50		
Jamami	Gabbro	12	75.5	10.8

In tutti i casi presentati (Tabella 5) è stato scelto di seguire la normativa ISRM.

	Marmo verde	12	100.6	7.4
	Calcare	12	102.9	8.1
Geranmayeh	Arenaria	42	44	-
Ferdosi et al.	Arenaria	54	36.2	-
	Granodiorite	42	105.1	-
	Granodiorite	54	120	-
Guo et al.	Scisto (orientazion e piani paralleli)	50	86.2	-
	Scisto (orientazion e piani trasversali)	50	116.5	-
Geranmayeh	Arenaria	42	41.7	
Thoeni et al.	Granodiorite	42	106.2	-

Tabella 5 Valori medi di UCS e UTS

6. Modelli interpretativi dei risultati delle prove

È comune, nella pratica dello studio dei materiali sottoposti a carico ciclico, analizzare l'evoluzione di un unico valore, descrivendone i risultati ottenuti rispetto ad una variabile fissa. È possibile, attraverso l'analisi delle misure e le relative osservazioni acquisite durante i test, ottenere direttamente alcune risposte sul comportamento delle rocce e sulla relativa vita a fatica dell'elemento: i risultati delle prove sui singoli provini vengono elaborati e rappresentati graficamente secondo diverse modalità. Sono anche possibili semplici post elaborazioni dei dati in grado di indagare alcuni aspetti più congeniali allo studio specifico.

Il risultato della prova viene solitamente espresso in funzione del numero di cicli per cui, mantenuti costanti gli altri parametri durante la prova, si verifica la rottura. In alternativa, è possibile inserire ulteriori variabili che andranno a completare le prove.

Si è quindi scelto di riferirsi a una variabile specifica in modo tale da poter analizzare, interpretare e confrontare i risultati sperimentali: è così possibile prevedere l'evoluzione di un campione di roccia dallo stato iniziale al cedimento: ad esempio, definendo quanti cicli di ampiezza costante devono ancora essere applicati prima della rottura.

Un indicatore di danno adeguato deve soddisfare diverse proprietà (Xiao et al. 2010) e, in particolare, deve:

- Avere un chiaro significato fisico;
- Essere misurato facilmente e applicato convenientemente;
- Rappresentare l'effettiva degradazione del materiale;
- Tenere conto del degrado iniziale dovuto al caricamento precedente;
- Aumentare in modo monotono tra zero (provino integro, inizio prova) e un valore finale (cedimento del provino, fine prova).

La deformazione assiale o volumetrica è una delle variabili più semplici da analizzare poiché viene misurata direttamente sul campione durante lo svolgimento della prova. Le curve sforzo-deformazione sono infatti tra le rappresentazioni più utilizzate (Figura 34) perché permettono attraverso estensometri applicati alla superficie del provino di misurare in continuo la deformazione in tutta la durata del test. Vengono quasi sempre rappresentate negli esperimenti che considerano un carico ciclico con ampiezza costante, dai quali è possibile notare come le deformazioni si accumulino un ciclo dopo l'altro con

velocità di accumulo della deformazione non costante durante tutto l'esperimento (Liu e He 2012).



Figura 32: Grafico con curva sforzo deformazione per carico ciclico su granito proveniente dalla regione di HengYang, China (Xiao et al 2008)

La dilatanza è il più delle volte osservata come conseguenza dell'apertura della fessura, specialmente a basso confinamento. È anche dimostrato che questa tipologia di carico porta ad un processo di frattura specifico differente da quello esistente nel carico monotono.

Anche il modulo elastico e la velocità delle onde P sono caratteristiche del mezzo che possono essere valutate, con dispositivi specifici, in maniera continua richiedendo poche elaborazioni: esse potrebbero fornire una stima del danno iniziale e della sua evoluzione. Tuttavia, una volta avvenuta la rottura, entrambi i parametri sono impossibili da ottenere e quindi non propriamente idonei.

L'evoluzione della permeabilità è un altro mezzo indiretto per valutare il danno nei campioni di roccia (Mitchell e Faulkner 2008, Schaefer et al. 2015, Wang et al. 2017): essa aumenta con l'incremento della densità delle crepe nel campione. La misurazione di questa variabile fisica è tuttavia piuttosto lenta e complicata.

Il numero di cicli che un campione può sopportare ad una certa frequenza ed intensità di sollecitazione variabile è un indicatore che può essere ben rappresentato in un grafico (Curva di Wohler) e descrive efficacemente il comportamento del cedimento a fatica del materiale in esame (Figura 35). Nella gran parte della bibliografia riportata, per quanto

riguarda i test a fatica ciclica nelle rocce, è uso comune rappresentare il risultato delle prove mediante le curve S-N.

Il problema di questa elaborazione sta nel fatto che sono necessarie molte prove sperimentali, di una certa durata, per arrivare ad un numero accettabile di dati con cui rappresentare l'andamento del parametro.



Figura 33: Esempio di curva S-N per materiale roccioso (Rajaram 1981)

Per tutti questi indicatori di danno, il discorso si complica quando si analizza nel dettaglio un certo comportamento della roccia, avente caratteristiche certamente non identiche tra un provino e l'altro, cercando di correlarli per i vari campioni e ottenere dei risultati coerenti con le condizioni del campione nella configurazione sperimentale. Le diverse condizioni sperimentali (confinamento, velocità di carico, anisotropia, saturazione, ecc.) influenzano le osservazioni. A causa della relativa complessità del comportamento è necessario definire concetti teorici e valori chiave per sfruttare i risultati e confrontare materiali o campioni rocciosi. In conclusione, l'elaborazione di un modello in grado di predire il comportamento lungo tutta la durata dell'esperimento è complicata anche per quanto riguarda i test di laboratorio: è quindi preferibile valutare solamente il cedimento o la rottura e descriverne le particolarità per le diverse rocce.

6.1. Curva S-N

La maggior parte delle prove di fatica in laboratorio sono eseguite su macchine a carico e ampiezza costante. Una serie di provini di roccia, tratti dallo stesso ammasso, viene provato nella macchina a differenti carichi massimi (carico, frequenza e ampiezza costanti) fino a quando si presenta il cedimento. I risultati così ottenuti vengono tracciati riportando il valore del carico applicato rispetto al numero di sollecitazioni richieste per produrre il cedimento. Una volta plottati questi dati, si dispongono naturalmente lungo la Curva S-N, o curva di Wohler, che prende il nome dal suo inventore. Quando però la tipologia di prova è tale da superare un certo numero di cicli, rendendo impossibile la lettura dei dati iniziali, è abitudine riportare i dati in un grafico semilogaritmico (scala logaritmica per il numero dei cicli di carico), e in questo caso si otterrà la distribuzione dei punti su una retta.

I materiali metallici sono largamente studiati e parametrizzati mediante questa curva che, nel caso, si compone di tre parti distinte. A sinistra, nel tratto AB della Figura 36, vi è una linea quasi retta a forte pendenza: in questa parte, definita *zona a limitata resistenza*, la resistenza alla fatica decresce rapidamente all'aumentare del numero di cicli di sollecitazione. Nella parte destra, oltre alla *soglia di fatica* del materiale, indicata come CD, la linea si mantiene retta parallela all'asse delle ascisse: è sotto a questo limite che i campioni possono resistere infinitamente alla sollecitazione da carico ciclico.

Fra le due parti della curva vi è la parte cosiddetta di transizione: essa viene generalmente indicata come ginocchio ed è la parte più interessante in termini di comportamento a fatica del materiale: la corretta interpretazione di questa zona porterebbe alla comprensione del comportamento di un certo metallo attraverso l'utilizzo di una singola funzione.


Figura 34: Le tre zone della curva S-N (Hosford 2010)

Per quanto riguarda le rocce, la maggior parte dei dati sulla fatica sono presentati sotto forma di curve S-N, con N convenzionalmente tracciato su una scala logaritmica. Il numero di cicli N che causano la rottura diminuisce all'aumentare dell'ampiezza della sollecitazione. Per alcune rocce soggette a carico ciclico, è dimostrato che esiste un valore di sollecitazione (limite di fatica) al di sotto della quale non si verificherà mai il cedimento. Questo limite non può però essere definito in maniera assoluta, a causa della loro eterogeneità intrinseca.

Purtroppo, per quanto concerne i grafici delle curve S-N riguardanti le rocce, in praticamente tutti i casi, non si ha una gran disponibilità di dati, principalmente a causa della complessità nella preparazione dei provini e della disponibilità di materiale con caratteristiche omogenee, che comporta una dispersione dei risultati ed il conseguente ostacolo nella definizione del comportamento del materiale in studio. In aggiunta, nel caso di un materiale geologico, le prove di carico ciclico sui provini non restituiscono una relazione biunivoca fra la sollecitazione S che provoca la rottura del provino ed il numero N di cicli in cui essa si verifica, ma una dispersione di punti nel piano S-N.

Per quanto riguarda l'interpretazione dei risultati, viene presupposta l'esistenza di un'espressione analitica in grado di mettere in relazione la sollecitazione massima e il numero di cicli a rottura e che consenta una interpolazione tra i risultati dispersi.

Si esclude la validità di una interpolazione di tipo lineare, in quanto la relazione deve necessariamente presentare un asintoto in corrispondenza del limite a fatica. Se però si ipotizza di conoscere la soglia di fatica per un certo materiale e si escludono i valori successivi a questo limite, una volta posizionati i dati sul diagramma semilogaritmico essi si disporranno lungo una retta e, pertanto, attraverso l'equazione di questa retta sarà possibile definire il comportamento del materiale nella zona di interesse maggiore, ossia quella corrispondente al numero di cicli che il materiale è in grado di tollerare sotto un determinato carico prima di arrivare al cedimento, corrispondente al tratto BC della Figura 36. Si definisce, pertanto, una funzione del tipo (Wholer):

$$\frac{S}{S_{max}} = a - b \log(N)$$

che descrive in opportunamente l'andamento dello sciame dei punti nel grafico S-logN. Basquin suggerisce un'altra formula:

$$\ln \frac{S}{S_{max}} = a - b \ln(N)$$

che rappresenta una linea nel diagramma log-log. Alcuni autori considerano preferibile la scelta di questa rappresentazione (Shanley, Lieurade).

Il valore di carico massimo è però teoricamente vario in ogni provino poiché la UCS non ha praticamente mai lo stesso valore, pertanto riferirsi ad una percentuale di un valore medio di sollecitazione non è un procedimento così accurato, ma è l'unico possibile. Inoltre il numero di cicli N per il quale i provini cedono, rappresenta valori medi di N e pertanto non così rappresentativi. Sarebbe quindi necessaria una campagna sperimentale per ogni provino con un numero molto elevato di prove, la qual cosa non è affatto di semplice realizzazione.

Sarebbe più giusto, in mancanza di molti dati sperimentali, scegliere il valore mediano più che quello medio: essendoci molta irregolarità tra pochi valori simili ed un valore di N di gran lunga maggiore, causato da un'anomalia nei provini, ciò andrebbe ad influire in maniera sproporzionata nei confronti del valore medio, creando una sorta di errore di valutazione.

Se si ipotizza che il cedimento a fatica sia causato dal progressivo danneggiamento del provino nei successivi cicli, che la progressione di questo danneggiamento sia una funzione ben definita di σ_{max} e di N, che il materiale sia definito mediante un unico valore di resistenza a compressione monotona UCS e il limite a fatica si ottenga moltiplicando quest'ultimo per un coefficiente caratteristico del materiale (costante in tutti i provini) cosicché un materiale possa essere descritto mediante la relazione $\frac{\sigma_{max}}{N}$ normalizzata, la dispersione dei risultati rispetto alla curva tipo del geomateriale dipende solo dal valore della UCS rispetto al valore medio.

Sono di seguito riportati i grafici delle curve S-N per le ricerche più significative reperite.

Sono, in particolare, state formulate alcune ipotesi che potessero in qualche modo riuscire a migliorare la comprensione delle caratteristiche delle rocce soggette a carico ciclico mediante l'utilizzo delle curve di Wohler e valutare l'influenza delle differenti composizioni litologiche sulle curve ottenute.

6.1.1. <u>Curve totali e depurate</u>

Vengono nel seguito riportati e commentati alcuni dei grafici S–N ottenuti da studi reperiti in letteratura, proponendo alcune elaborazioni dei dati di laboratorio.

Per quanto riguarda la rappresentazione della curva, se ne possono individuare due principali metodologie attraverso l'elaborazione dei dati sperimentali (Cardu 1988):

- Inserimento di tutti i valori ricavati dalle prove di carico ciclico nel diagramma semilogaritmico S-N con ottenimento di un andamento della curva $\frac{S_{max}}{N}$ media, ottenuta utilizzando i valori medi del numero dei cicli a rottura per ciascun valore di S_{max} .
- Scelta del valore mediano di N per ognuno dei valori di $\frac{S}{S_{max}}$ e realizzazione del grafico con questi valori. Questa soluzione può essere adottata nei casi dove la componente casuale è rilevante ed irriducibile.

I due procedimenti esposti porterebbero allo stesso risultato se la distribuzione delle probabilità di sopravvivenza fosse simmetrica rispetto al valore medio (ipotesi molto remota) oppure, come accade per molte elaborazioni, esiste un solo valore per ogni rapporto di sollecitazione, escludendo una possibile post elaborazione.

Nei grafici che seguono i dati di colore blu indicano tutti i dati sperimentali raccolti dalle diverse prove; quelli di colore arancione rappresentano i valori mediani per ogni rapporto

 $\frac{s}{s_{max}}$. In presenza di un numero pari di dati, per lo stesso rapporto di sollecitazione vengono riportati i due dati centrali.

Sono anche riportati per ogni grafico le funzioni interpolanti e il coefficiente di determinazione R^2 .

Il confronto tra le due metodologie sarà inoltre effettuato per i casi più significativi.

Per quanto riguarda le curve prese singolarmente, esse dipendono molto dai diversi parametri scelti per lo sviluppo della prova e dal tipo di prova effettuata.

Non è stato possibile riscontrare grandi differenze tra le analisi eseguite considerando i valori medi o i valori mediani.

Le varie differenze tra le interpretazioni con le funzioni interpolatrici hanno dato diversi tipi di risultati:

- Sovrapposizione delle due rette, causata dalla differenza nel coefficiente *b* di inclinazione della retta nel grafico logaritmico, in cui si può avere una inclinazione maggiore della retta filtrata rispetto a quella non filtrata:

 $b_{dati\ filtrati} > b_{dati\ non\ filtrati}$ o viceversa.

- Curva S-N media con valori minori/maggiori rispetto alla curva con i valori mediani. Essenziale in questo caso è la valutazione del coefficiente *a*.

L'importanza nell'interpretare il comportamento di questo filtraggio potrebbe essere l'ottenimento di una migliore comprensione delle circostanze e del contesto in cui si viene ad operare e in quale dei due casi si ha la soluzione più cautelativa.

Vengono riportati, per un confronto coerente, i risultati ottenuti da test di laboratorio con un numero di dati sufficiente ad effettuare le elaborazioni.

Le rocce riportate nello studio hanno, naturalmente, diverse litologie; viene inoltre presentato un caso di test a trazione brasiliana.

Caso 1: studio realizzato da Rajaram (1981); i valori sperimentali filtrati sono riferiti a resistenza ai cicli di sollecitazione maggiori rispetto alla retta che considera tutti i dati del test.



Figura 35: Granito di Westerly (Rajaram 1981) prova eseguita in compressione uniassiale, frequenza 1 Hz, con numero di cicli massimo pari a 10⁶, ampiezza di carico costante

Caso 2: Studio realizzato da Sholtz (1979) sulla medesima roccia analizzata da Rajaram. Dal grafico si nota che le due rette hanno andamenti divergenti, causati da valori di b decisamente differenti.



Figura 36: Granito di Westerly (Rajaram 1979) prova eseguita in compressione uniassiale, frequenza 1 Hz, con numero di cicli massimo pari a 3200, ampiezza di carico costante.

Caso 3: Studio realizzato da Ishizuka (1990) dove sono presenti valori di b differenti che fanno sovrapporre le due rette.



Figura 37: Granito inada (Ishizuka 1990) prova eseguita in compressione uniassiale, frequenza 0.5 Hz, con numero di cicli massimo pari a 1638200, ampiezza di carico costante.

Caso 4: Studio realizzato da Erarslan (2012) condotto mediante prova a trazione indiretta. Sono presenti valori di b differenti ma ciò non causa la sovrapposizione delle due rette. In questo caso la retta con tutti i valori sperimentali fornisce una stima della curva di Wholer con numeri di cicli minori rispetto ai valori filtrati, considerando tutti i dati si avrà una maggior sicurezza nei confronti del cedimento a cui può resistere la roccia.



Figura 38:Tufo (Erarslan) prova eseguita in trazione brasiliana, frequenza 1 Hz, con numero di cicli massimo pari a 50000, ampiezza di carico costante.

Caso 5: Studio realizzato da Cardu (1988) condotto mediante prova a compressione uniassiale. Sono presenti valori di b differenti che portano ad una netta differenza tra le inclinazioni delle rette. In questo caso una condizione maggiormente cautelativa potrebbe essere garantita considerando la parte dei dati sperimentali fino al punto di intersezione e successivamente la retta con tutti i valori sperimentali.



Figura 39: Calcare Masua (Cardu 1988) prova eseguita in compressione uniassiale, frequenza 2 Hz, con numero di cicli massimo pari a 1370022, ampiezza di carico costante.

Caso 6: Test sperimentali condotti su campioni di marmo da Haminson (1971). In questo caso specifico le rette sono praticamente sovrapposte, non generando particolari differenze nell'elaborazione dei dati. Questa condizione può essere dovuta alla natura stessa della roccia in esame che si presenta generalmente omogenea nell'ammasso.



Figura 40: Marmo (Haimson 1971) prova eseguita in compressione uniassiale, frequenza 2-4 Hz, con numero di cicli massimo pari a 1638200, ampiezza di carico costante.

Come si nota dai grafici, non vi è alcuna relazione riscontrabile dal confronto operato che possa indicare una particolare connessione tra le curve costruite con tutti i dati e le curve ottenute dai dati depurati. Le variabili sono quindi casuali, hanno talvolta valori molto incostanti rispetto al valore mediano e pertanto non è possibile osservare alcuna corrispondenza tra le curve filtrate e non filtrate.

6.1.2. Analisi della anisotropia della roccia

La differenza di resistenza al carico ciclico nelle diverse orientazioni per roccia trasversalmente anisotropa è ben visibile nel caso dei provini di scisto (Figura 42), prelevati nelle due direzioni principali rispetto al piano di scistosità, dalla formazione Longmaxi sull'affioramento di Nanchuan nella provincia di Chongqing, in Cina (Guo 2018).

Dal confronto delle curve S-N è riconoscibile come, una volta posti i valori sul grafico semilogaritmico ed individuate le due rette interpolanti, i provini con i piani di scistosità paralleli all'asse di applicazione del carico abbiano vita minore quando sottoposti alla medesima sollecitazione.

In Figura 43 sono riportate mediante uno schema molto semplificato le due tipologie di orientazione dei piani di scistosità dei provini raccolti per il test.



Figura 41 Grafico S – log N per lo scisto (Guo 2018)



Figura 42 provino con piani di scistosità paralleli alla direzione del carico, a destra provino con piani di scistosità perpendicolare alla direzione del carico.

6.1.3. Analisi in base ai differenti litotipi

Vengono riportati in Figura 45 i dati sperimentali relativi ai differenti litotipi ritrovati in letteratura ed è proposto un confronto generale delle Curve S-N nel grafico semilogaritmico. I dati riportati si riferiscono al tratto di maggiore interesse, ossia quello caratterizzato da un valore di sollecitazione massimo fino alla soglia di resistenza del materiale, oltre la quale, non vi è un interesse specifico nell'analisi dei dati.

Dal grafico si nota come le ipotesi effettuate siano in generale ben corrisposte: si osserva infatti una diminuzione del numero di cicli rispetto alla sollecitazione per rocce con una fragilità crescente, indicate già in precedenza come più suscettibili al carico ciclico.

Inoltre, avendo una rappresentazione così variegata, si considerano anche le rocce che, nonostante appartengano alla stessa famiglia, hanno un comportamento per certi aspetti molto differente. In questa considerazione vanno incluse sicuramente le arenarie poiché, come è possibile notare dal grafico, sono rocce in generale molto eterogenee e possono avere natura molto varia a partire dal tipo di cementazione che sostiene lo scheletro granulare.

Per quanto riguarda i calcari e la grovacca è importante dire che i risultati riportati nel grafico derivano da pochi studi (per la grovacca solo uno) e quindi potrebbero essere in qualche modo non esaustivi nella descrizione del particolare comportamento geomeccanico.

I dati graficati sono relativi a tutti i dati di laboratorio reperiti in rete senza eseguire alcuna filtrazione poiché non era stato dapprima rilevato alcun vantaggio nell'operazione.

È necessario inoltre ricordare che i dati sono rappresentativi di molti studi raccolti in bibliografia ed uno dei problemi relativo ad esso sta nel fatto che molte prove sono state condotte in modo diverso e i dati relativi ai diversi studi hanno un numero di dati differenti tra l'uno e l'altro. Ne consegue una certa disparità di influenza tra i dati raccolti dai diversi autori.



Figura 43: Valori sperimentali delle curve S-N ottenuti per le diverse rocce e graficati secondo i differenti litotipi a cui appartengono.

7. Conclusioni

Ripetute sollecitazioni sul materiale roccioso portano a un aumento costante della deformazione e dei danni che si traduce progressivamente in instabilità e rottura della roccia, inficiando la loro resistenza a lungo termine.

I cicli di sollecitazione indotti da attività civili ed estrattive spesso (anche se non sempre) sono molto più complessi di quelli cui si sottopone il materiale nei test di laboratorio, e anche il processo di carico-scarico è più complicato e accompagnato da altri carichi dinamici. Le prove di laboratorio sono quindi limitate nel riprodurre il vero ambiente di sollecitazione a cui viene a trovarsi la roccia. Ciò nonostante, sollecitazioni periodiche simili possono essere semplificate in termini di carico ciclico e lo studio del processo di rottura per fatica, con macchine concepite in laboratorio, rimane un metodo sicuro ed efficiente per valutare la stabilità dell'ammasso e le sollecitazioni che questo è in grado di sopportare, prevenendone i cedimenti improvvisi.

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di fornire una panoramica dei principali strumenti d'indagine utilizzati per lo studio del comportamento a fatica. Sono state inizialmente illustrate le principali motivazioni dello studio della roccia sottoposta a carico ciclico. Il carico ciclico sulle rocce può infatti causare diversi tipi di degrado nei confronti delle caratteristiche geomeccaniche del materiale. Una pronta conoscenza di questo fenomeno potrebbe aiutare l'ingegnere durante il lavoro di progettazione, consentendogli di disporre delle principali metodologie per uno studio sperimentale del fenomeno. È di fondamentale importanza la valutazione del comportamento dei geomateriali impiegati in tutte le opere che hanno a che fare con l'ingegneria civile e mineraria, per prevenirne eventuali cedimenti.

Sono poi stati descritti in dettaglio i risultati tipici osservati, le principali caratteristiche della fatica meccanica e la corrispondente risposta della roccia.

In particolare, sono state analizzate ricerche riguardanti alcuni parametri caratteristici del carico ciclico nella roccia: l'influenza delle caratteristiche intrinseche del materiale, l'ipotesi dell'esistenza del limite di fatica e i metodi empirici per la valutazione delle variabili più importanti derivate dagli esperimenti. Sono riportate le principali analisi sull'effetto dell'ampiezza di carico, della frequenza e della sollecitazione massima sulla vita a fatica del provino. È stato quindi esaminato il comportamento di deterioramento dei parametri della roccia durante le prove di sollecitazione ciclica. Inoltre, particolare

importanza è stata data al meccanismo di fratturazione della roccia, effettuando un accurato confronto tra ricerche di natura molto distinta che hanno portato alla formulazione di una interpretazione basata sulla natura chimica, la storia geologica e la geometria della roccia in esame.

Il lavoro presenta in ultima analisi una breve panoramica dei risultati e dei metodi sperimentali adottati comunemente nella pratica dai ricercatori: grazie ai dati reperiti in letteratura è stato possibile operare un confronto fra le curve di Wholer per diverse tipologie di rocce sottoposte a carico ciclico. Da questa comparazione sono emerse alcune considerazioni interessanti riguardanti le differenze di comportamento tra le diverse litologie e la previsione generale del limite a fatica dei materiali. È necessario però ribadire che le curve S-N sono in grado di fornire solamente informazioni parziali, particolari per lo studio in esame ed essenzialmente limitate nell'applicazione. Inoltre si osserva come uno dei problemi maggiori riguardanti il tema della fatica è che ogni analisi è molto gravosa in termini di tempo e capitali, poiché la previsione esatta della cinetica di rottura è impossibile da ottenere in assenza di una quantità adeguata di prove. In tal senso una teorizzazione del problema potrebbe essere di grande aiuto in tutti i casi dove vi è mancanza di uno o dell'altro. Ancora, una inevitabile piccola variazione delle proprietà del materiale porta ad un'elevata dispersione dei risultati e ad un ampio spettro di risultati.

La definizione di un indicatore di fatica affidabile sarebbe in grado di aiutare con successo i ricercatori ad analizzare e interpretare i risultati, ma la difficoltà sta proprio nella sua ricerca (o nella ricerca di una combinazione di indicatori). Quest'ultima rimane quindi una questione importante, soprattutto per il monitoraggio del lavoro, permettendo di ricavare dai risultati ottenuti in laboratorio una legge di evoluzione di un indicatore di fatica per campioni di roccia e derivare una legge costitutiva complessa applicabile alla modellazione.

La speranza è che questo lavoro possa servire ad altri ricercatori per la progettazione di nuovi esperimenti o lo sviluppo di una modellizzazione pertinente delle applicazioni reali.

8. Ringraziamenti

Ho aspettato tanto questo momento e mi sono reso conto solamente adesso di non essermi mai chiesto come sarei stato alla fine del mio percorso, forse per la paura e la delusione di un eventuale fallimento o forse perché ho sempre visto il traguardo troppo lontano e la vetta della montagna altrettanto irraggiungibile. Nonostante il periodo di pandemia in corso mi faccia sentire un poco smarrito e la situazione sia alquanto instabile mi sento in grado di dire che questo percorso mi abbia permesso di maturare e rendermi consapevole delle mie potenzialità. Ragionando a mente fredda penso che tutti i giorni passati al Politecnico mi abbiano principalmente insegnato a pensare come un Ingegnere e, nonostante la fine di un percorso porti con sé dubbi e incertezze sull'avvenire, mi sento pronto per il prossimo passo.

Ma prima di tutto desidero dedicare qualche parola a chi mi è stato accanto fino ad ora.

Il mio primo pensiero e ringraziamento va alla mia famiglia e soprattutto ai miei genitori che mi hanno permesso in tutti questi anni di accrescere la mia cultura personale, avendo la possibilità di prendere scelte individuali, senza alcuna limitazione di alcun genere. Per questo gliene sarò sempre grato. Ringrazio inoltre mio fratello che specialmente in quest'ultimo periodo mi è stato accanto spronandomi a fare sempre meglio.

Ringrazio la Professoressa Cardu per la sua generosità e per la disponibilità dimostratami durante questo lavoro di tesi. Nonostante il periodo non fosse dei migliori ho sempre potuto fare affidamento su di Lei e mi sono sentito sempre al centro del progetto per cui lavoravo. La ringrazio inoltre per il Suo amore nella materia e nella professione grazie al quale ho intrapreso questo percorso magistrale dopo aver frequentato il corso di Ingegneria degli Scavi di cui Lei era docente.

Ringrazio i miei compagni di Torino, universitari e non, che sono riusciti ad alleviare le giornate di studio nonostante le moli di lavoro molto spesso non umanamente sopportabili. Grazie in ordine sparso ad Andrea, Thomas, Nicola, Tommaso, Franco, Stefano, Filippo.

I miei coinquilini che si sono succeduti durante gli anni, Alessandro, Elia, Beatrice, Davide, Tommaso e Simone (si ti considero come un coinquilino dopo tutte le avventure passate) dai quali ho imparato molto, che la vita non è fatta solo di sacrifici ma anche di soddisfazioni e conquiste. I miei amici di Pettenasco, amici da una vita e per la vita.

Infine per ultima chi, durante questi anni, quelli più belli della vita, mi ha fatto vivere emozioni indimenticabili ed ha sempre creduto in me. Spero il nostro fuoco non si possa mai spegnere. Grazie Camilla.

Ho fiducia che la conclusione di questo percorso sia solamente il primo passo verso una vita ricca di soddisfazioni.

Gregorio

9. Bibliografia

Aggelis DG, Soulioti DV, Sapouridis N, Barkoula NM, Paipetis AS, Matikas TEN Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre reinforced concrete. Constr Build Mater 2011.

Aires-Barros L., Experiments on thermal fatigue of non-igneous. Engineering Geology 1977.

Aires-Barros L, Graca RC, Velez A. Dry and wet laboratory tests and thermal fatigue of rocks. Engineering Geology, 1975.

Albert, Über Treibseile am Harz, Archive für Mineralogie Geognosie Bergbau und Hüttenkunde, 1838.

Atkinson BK. Subcritical crack growth in geological materials. J Geophys Res 1984.

Attewell P, Farmer W Fatigue behaviour of rock. Int J Rock Mech Min Sci 1973.

Attewell P, Sandford M Intrinsic shear strength of a brittle, anisotropic rock: experimental and mechanical interpretation. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 1974.

Bagde, V. Petros, Waveform effect on fatigue properties of intact sandstone in uniaxial cyclical loading Rock Mech Rock Eng, 2005.

Bagde MN, Petros V., Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading. Int J Rock Mech Min Sci, 2005.

Bagde, V. Petros, Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading Int J Rock Mech Min Sci, 2009.

Burdine N Rock failure under dynamic loading conditions. Soc Petrol Eng J 3(01), 1963.

Bieniawski Z, Mechanism of brittle fracture of rock: Theory of the fracture process, National Mechanical Engineering Research Institute, Pretoria, South Africa 1967.

Bieniawski, Z. T., and M. J. Bernede. 1979. "ISRM suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1979

Campbell, F. C. Elements of metallurgy and engineering alloys, chapter 14. USA: ASM International. 2008.

Cardani G, Meda A: Marble behaviour under monotonic and cyclic loading in tension. Constr Build Mater 2004.

Cattaneo S, Labuz J : Damage of marble from cyclic loading. J Mater Civ Eng 2001.

Cavallini, V. Di Cocco, F. Iacoviello, rotture per fatica due secoli di studi, 14° Convegno AIPnD Associazione Italiana Prove non Distruttive 2011.

Cardu, Il fenomeno della fatica ciclica nei materiali rocciosi. Studio sperimentale sul comportamento del calcare microcristallino di Masua (Sardegna). Tesi di dottorato di ricerca, Politecnico di Torino, 1988.

Costin LS, Holcomb DJ. Time-dependent failure of rock under cyclic loading. Geomechanics Division 5532, Sandia National Laboratories, Albuquerque, N.M. 87185 U.S.A. 1981.

Cerfontaine, B. & Collin, F. Cyclic and fatigue behaviour of rock materials: review, interpretation and research perspectives. Rock Mech Rock Eng 2018

Clemmer, H. Fatigue of concrete. Paper presented at the Proceedings, ASTM, 1922.

Chen, T.C., Yeung, M.R. & Mori, N. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action. Cold Reg Sci Technol 2004.

Chen, W. & Konietzky, H. Simulation of heterogeneity, creep, damage and lifetime for loaded brittle rocks. TU Bergakademie Freiberg, Geotechnical Institute, Germany 2014.

Cho S, Ogata Y, Kaneko K: Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock. Int J Rock Mech Min Sci 2003.

Cruden D: The static fatigue of brittle rock under uniaxial compression. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 1974.

Dainty, and J. S. Pallister. "The influence of thermal and cyclic stressing on the strength of rocks from Mount St. Helens, Washington." Bull. Volcanol. 2013.

Dieter, G. E. Mechanical metallurgy. London: McGraw-Hill New York. 1998.

Erarslan, D.J. Williams, The damage mechanism of rock fatigue and its relationship to the fracture toughness of rocks, Golder Geomechanics Centre, School of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia 2012.

Erarslan N, Williams D: Mechanism of rock fatigue damage in terms of fracturing modes. Int J Fatigue Golder Geomechanics Centre, School of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia 2012.

Evans, A.G., Fuller, E.R. Crack propagation in ceramic materials under cyclic loading conditions. Metall Mater Trans B 5, 27 (1974).

Fan J, Chen J, Jiang D, Chemenda A, Chen J, Ambre J: Discontinuous cyclic loading tests of salt with acoustic emission monitoring. Int J Fatigue 2017.

Fan, J., J. Chen, D. Jiang, S. Ren, and J. Wu. "Fatigue properties of rock salt subjected to interval cyclic pressure." Int. J. Fatigue 2016

Ge, X., Jiang, Y., Lu, R. & Ren, J. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading. Chinese J Rock Mech Eng 2003.

Ge, X. & Lu, Y. study on fatigue damage and irreversible deformation law of rock under cyclic. Chinese J Geotechical Eng 1992.

Geranmayeh, Vaneghi Behnam, Ferdosi Achola, D.Okoth Barnabas Kuek, Strength degradation of sandstone and granodiorite under uniaxial cyclic loading, Department of Mining Engineering and Metallurgical Engineering, Western Australian School of Mines (WASM), Curtin University, Kalgoorlie, Australia 2018.

Guo Y, Yang C, Mao H Mechanical properties of Jintan mine rock salt under complex stress paths. Int J Rock Mech Min Sci, 2012.

Haimson BC, Kim CM: Mechanical behaviour of rock under cyclic fatigue. In: Cording EJ (ed) Stability of rock slopes. Proceedings of the 13th symposium on rock mechanics. ASCE, New York, 1971.

Hailiang Jia Wei Xiang Michael Krautblatter Attawel PB, Farmer IW. Fatigue behavior of rock. Int J Rock Mech Min 1973.

Haimson BC, Kim CM. Mechanical behaviour of rock under cyclic fatigue. Rock Mech 1971.

Haimson BC. Effect of cyclic loading on rock. Dynamic Geotechnical Testing, 654. ASTM STP; 1978.

Hall K. Rock temperatures and implications for cold region weathering. I-II: New data from Viking Valley, Alexander Island (Antarctica). Permafrost and Periglacial Processes 1997.

Hall K. The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions. Geomorphology 31: 1999.

Hall K, André MF. New insights into rock weathering as deduced from high frequency rock temperature data: an Antarctic study. Geomorphology 41: 2001.

Hall K, Thorn CE. Thermal fatigue and thermal shock in bedrock: An attempt to unravel the geomorphic processes and products. Geomorphology 206, 2014.

Hardy, H. R. "Failure of geologic materials under low cycle fatigue." In Proc., 6th Canadian Rock Mechanics Symp.,33–47. Ottawa: Department of energy, Mines and Resources 1970.

Hamid Reza Nejati & Abdolhadi Ghazvinian, Brittleness Effect on Rock Fatigue Damage Evolution, Rock Mechanics and Rock Engineering volume 47, 2013.

Haghgouei, H. Hashemolhosseini, H., A. Baghbanan, S. Jamali Zavareh, Effect of Micro-Structure on Fatigue Behavior of Intact Rocks under Completely Reversed Loading, Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering 6, 55-62 2017.

He, M., N. Li, Y. Chen, and C. Zhu., "Strength and fatigue properties of sandstone under dynamic cyclic loading." Shock Vib 2016.

He, M., Huang, B., Zhu, C. et al. (2018) Energy dissipation-based method for fatigue life prediction of rock salt. Rock Mech Rock Eng 2018.

Henry, H.A.L. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements. Soil Biol Biochem 2007.

Hoek, E., & Brown, E. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotech. Engineering Div., 106(GT9), 1032-1035.

Hu, X., Lu, Q., Xu, Z. et al. Compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete under cyclic loading. Constr Build Mater 2018.

Hudson, C. A study of fatigue and fracture in 7075-T6 aluminium alloy in vacuum and air Environments.NASA, Langley Research Center Hampton, 1973.

ISRM In: Brown ET (ed) Suggested methods: rock characterization, testing and monitoring. Pergamon Press, Oxford 1981.

Ishizuka, Y., T. Abe, and J. Kodama, "Fatigue behaviour of granite under cyclic loading." In Proc., ISRM Int. Symp. Paris: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering 1990.

Jardine, R. Interim Report on Cyclic Loading Model and Synthetic Soil Profile for HSE Funded Pile Cyclic Loading Study. Imperial College Consultants (ICON), 1998.

Jardine, R., & Chow, F. New design methods for offshore piles.London: Marine Technology Directorate 1996.

Jardine, R., & Standing, J. Pile Load Testing Performed for HSE Cyclic Loading Study at Dunkirk, France.Kendrick, J. E., R. Smith, P. Sammonds, P. G. Meredith, M 2000.

Jia, H., Wang, E., Song, D. et al. Precursory changes in wave velocity for coal and rock samples under cyclic loading. Results Phys 2019.

Jia HL, Liu QB, Xiang W, Zhang WL, Lang LZ. Damage evolution model of saturated sandstone under freeze-thaw cycles. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2013.

Jiang, F., Liu, R. & Zhang, D. A fatigue damage function based on energy analysis. J Harbin Eng Univ 1994.

Jing, L., Stephansson, O. & Nordlund, E. Study of rock joints under cyclic loading conditions. Rock Mech Rock Eng 26:215–232.M. 2003

Kendrick, J. E., R. Smith, P. Sammonds, P. G. Meredith, M. Dainty, and J. S. Pallister. "The influence of thermal and cyclic stressing on the strength of rocks from Mount St. Helens, Washington."Bull. Volcanol 2013.

Kim, D., & Ha, S. (2014). Effects of Particle Size on the Shear Behavior of Coarse Grained Soils Reinforced with Geogrid. Materials, 7, 963-979 Lee, J., & Rhee, C. (1992, March). A study on the Fatigue Failure Behaviour of Cheon-Ho Mt. Limestone Under Cyclic Loading. Journal of the Korean Nuclear Society, 24, 98-109.

Lee, Y.-L. Fatigue testing and analysis: theory and practice. USA: Butterworth-Heinemann. 2005.

Li, X., F. Gong, M. Tao, L. Dong, K. Du, C. Ma, Z. Zhou, and T. Yin. "Failure mechanism and coupled static-dynamic loading theory in deep hard rock mining: A review." J. Rock Mech. Geotech. Eng, 2017.

Liu E, He S, Effects of cyclic dynamic loading on the mechanical properties of intact rock samples under confining pressure conditions. Eng Geol 2012.

Matsuoka N. Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach. Cold Regions Science and Technology, Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Ibaraki 1990.

Matsuoka N, Murton JB. Frost Weathering: Recent Advances and Future Directions. Permafrost and Periglacial Processes, Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Ibaraki 2008.

Momeni, A., M. Karakus, G. R. Khanlari, and M. Heidari. "Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2015.

Moore and Kommers, The fatigue of metal, Mc. Graw-Hill Book Company, 1927.

Moore, Lockner, The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite. J Struct Geol 17, 1995.

Miner, M.: Cumulative damage in fatigue. In. Journal if applied mechanics, 12(3), 159-164, 1945.

Nasseri MHB, Mohanty B, Young RP Fracture toughness measurements and acoustic emission activity in brittle rocks. Pure Appl Geophys, 2006.

Nejati H, Ghazvinian A, Brittleness effect on rock fatigue damage evolution. Rock Mech Rock Eng 2014.

Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern (Life Length of Roller Bearings. In German). Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (VDI Zeitschrift), 68(14), 1924.

Paris, F. Erdogan, Transactions of the ASME, series D, J. Basic Engrg, 85D (4) 1963.

Paris, H. Tada, J.K. Donald: Service load fatigue damage, a historical perspective; Int. J. of Fatigue, 1999.

Peng, J., and S.-Q. Yang "Comparison of mechanical behavior and acoustic emission characteristics of three thermally-damaged rocks." Energies 11 (9): 2018.

Poncelet, Introduction à la Mècanique Industrielle Physique ou Expérimentale, 1839.

Pytlik, R., & Van Baars, S.: Fatigue of geomaterials. Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics(p. 88). Kyoto, Japan: CRC Press/Balkema 2014.

Pytlik, R., & Van Baars, S.: Laboratory tests on Dutch limestone (Mergel). In W. Schubert, & A. Kluckner (Ed.), Future Development of Rock Mechanics -Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium(pp. 439-444). Salzburg, Austria: Austrian Society for Geomechanics 2015.

Pytlik, R., & Van Baars, S.: Triaxiaalproeven op Limburgse mergel leveren verassende resultaten. Geotechniek, 10-13 2015.

Qiao C.S., Fatigue life characteristics of limestone in karst tunnel, Rock Dynamics Summit 2019.

Rajaram, V. "Mechanical behavior of granite under cyclic compression." In Proc., Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics., University of Missouri 1981.

Ray, S. K., M. Sarkar, and T. N. Singh. "Effect of cyclic loading and strain rate on the mechanical behaviour of sandstone." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1999.

Royer-Carfagni, G., and W. Salvatore "The characterization of marble by cyclic compression loading: Experimental results." Mech. Cohesive Frict. Mater. 2000

Ruedrich J, Kirchner D, Siegesmund S. Physical weathering of building stones induced by freeze-thaw action: a laboratory long-term study. Environmental Earth Sciences 2011.

Schijve, J. Fatigue of structures and materials. Dordrecht, Netherlands: Springer 2008.

Scholz, C. H., and T. A. Koczynski "Dilatancy anisotropy and the response of rock to large cyclic loads." J. Geophys. Res.: Solid Earth 1979.

Smith D.L., History of metallography, The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, 1988.

Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G., Liu, X., & Gao, Z. Mechanical engineering design (9th ed.). New York, USA: McGraw-Hill, 2011.

Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. Metal fatigue in engineering. USA: John Wiley & Sons. 2000.

Shah SG, Kishen JMC Use of acoustic emissions in flexural fatigue crack growth studies on concrete. Eng Fract Mech 2012.

Singh, S.: Fatigue Strength of Hybrid Steel-Polypropylene Fibrous Concrete Beams in Flexure. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction.14. Elsevier 2011.

Taheri, A., N. Hamzah, and Q. Dai. "Degradation and improvement of mechanical properties of rock under triaxial compressive cyclic loading." Jpn. Geotech. Soc. Spec. Publ. 5 (2): 2017.

Taheri, A., A. Royle, Z. Yang, and Y. Zhao. "Study on variations of peak strength of a sandstone during cyclic loading." Geomech. Geophys. Geo-Energy Geo-Resources 2016.

Taheri, A., N. Yfantidis, C. Olivares, B. Connelly, and T. Bastian. "Experimental study on degradation of mechanical properties of sandstone under different cyclic loadings."Geotech. Test 2016.

Tien, Y. M., D. H. Lee, and C. H. Juang, "Strain, pore pressure and fatigue characteristics of sandstone under various load conditions." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1990.

Vaneghi, Rashid Thoeni, Klaus Byskin, Arcady Sharifzadeh, Mostafa Sarmadivaleh, Mohammad, Strength and Damage Response of Sandstone and Granodiorite under Different Loading Conditions of Multistage Uniaxial Cyclic Compression, International Journal of Geomechanics, 2020.

Vutukiri, V. S., R. D. Lama, and S. S. Saluja. Handbook on mechan ical properties of rocks (Series on Rocks and Soil Mechanics). Zurich, Switzerland: Trans Tech 1978.

Wang, Z., S. Li, L. Qiao, and J. Zhao. 2013. "Fatigue behavior of granite subjected to cyclic loading under triaxial compression condition." Rock Mech. Rock Eng. 2013.

Wang, W., M. Wang, and X. Liu. "Study on mechanical features of Brazilian splitting fatigue tests of salt rock." Adv. Civ. Eng. 2016.

Weibull, W.: A statistical report of fatigue failure in solids. Transactions, 27 1949.

Wholer, Zeitschrift für Bauwesen, hrsg. im Preußischen Finanzministerium 1870.

Xiao, J.-Q., Ding, D.-X., Jiang, F.-L. & Xu, G. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading. Int J Rock Mech Min Sci 2010.

Xiao, J.-Q., Ding, D.-X., Xu, G. & Jiang, F.-L. Inverted S-shaped model for nonlinear fatigue damage of rock. Int J Rock Mech Min Sci 2009.

Xie, H., Peng, R. & Ju, Y. Energy dissipation of rock deformation and fracture. Chinese J Rock Mech Eng 2004.

Xu, J. Mechanics of fatigue. Science Press, Beijing 2016.

Xu, D., & Geng, N.: The variation law of rock strength with increase of intermediate principal stress (in Chinese). Acta Mechanics Solida Sinica, 7(1), 72–80 1985.

Xu, J., Tang, Y. & Zhou, J. Effect of drying-wetting cycles on aggregate breakdown for yellow-brown earths in karst areas. Geoenvironmental Disasters 2017.

Yamashita, S., F. Sugimoto, T. Imai, D. Namsrai, M. Yamauchi, and N. Kamoshida "The relationship between the failure process of the creep or fatigue test and of the conventional compression test on rock."In Proc., 9th ISRM Congress., 699–702. Paris: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering 1999.

Yintong Guo, Chunhe Yang, Lei Wang, and Feng Xu, Effects of Cyclic Loading on the Mechanical Properties of Mature Bedding Shale, 2018.

Young RP, Martin CD, Potential role of acoustic emission/microseismicity investigations in the site characterization and performance monitoring of nuclear waste repositories. Int J Rock Mech Min Sci 1993.

Xiao JQ, Ding DX, Jiang FL, Xu G Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading. Int J Rock Mech Min Sci, 2010.

Zhenyu, T., & Haihong, M.: Technical note: an experimental study and analysis of the behaviour of rock under cyclic loading. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1990.

Zietlow WK, Labuz JF, Measurement of the intrinsic process zone in rock using acoustic emission. Int J Rock Mech Min Sci 1998.

10. Elenco Figure e Tabelle

Figura 1 Apparecchio rappresentante la macchina di prova del tipo a trave a sbalzo
rotante concepita da Wohler: i provini d'acciaio (S) sono sottoposti a carico mediante le
molle P e posti in rotazione dalla puleggia D 19
Figura 2 Esempio di curve S-N per i metalli con, in ordine dall'alto, coordinate
cartesiane, coordinate semilogaritmiche e coordinate bilogaritmiche (Moore and
Kommers)
Figura 3: Segnale di carico ciclico
Figura 4: Tipico segnale a gradini
Figura 5: Segnale a rampa
Figura 6: Test con controllo del danno
Figura 7: test di compressione triassiale con pressione di confinamento differente:
deformazione residua (%) a differenti pressioni di confinamento (Liu et al. 2011) 36
Figura 8: Schema di applicazione del carico test a compressione uniassiale
Figura 9: Schema macchinario per prova di trazione diretta utilizzata da Chen et al.
(2016) con A-A' piano di simmetria
Figura 10: Schemi di applicazione del carico di trazione sul provino: a sinistra test di
trazione diretta, a destra test di trazione brasiliano
Figura 11: Schema di applicazione di carico test di taglio a fatica
Figura 12: Schema applicazione del carico nel test torsionale a fatica
Figura 13: Schema carico test di flessione a fatica
Figura 14: Diagramma tratto da Schmidtke e Lajtai (1985) che mostra la dipendenza del
rapporto di sollecitazione rispetto alla durata della vita di un provino nella prova a fatica
statica
Figura 15: Schema di carico test a fatica statica
Figura 16: Grafico temperatura-tempo per prova a fatica con cicli di congelamento-
scongelamento
Figura 17: Grafico Contenuto d'acqua-tempo per prova a fatica con cicli di bagnatura-
essiccazione
Figura 18: Confronto vita a fatica mediante grafico S – N per due rocce con litologia
differente
Figura 19 Tendenza della diminuzione della vita a fatica dei provini di arenaria in
relazione all'aumento dell'ampiezza di carico Singh He et al. (2016) Taheri et al.

(2016). I campioni di arenaria sono stati caricati per più di 100 cicli con un'ampiezza di
carico di 40 MPa, mentre sono giunti a rottura subito dopo 2 cicli quando l'ampiezza di
carico è aumentata a 47 MPa (Taheri et al., 2016)
Figura 20 confronto della deformazione residua in relazione al numero di cicli e
frequenza per i provini di granodiorite e arenaria (Geranmayeh et al.2018)
Figura 21 schema di carico CCL e SCL a confronto, Geranmayeh e Ferdosi (2018) 50
Figura 22 confronto tra gli spettri di carico, Erarslan et al (2014)
Figura 23 esempio di campioni con fessura indotta (Li et al. 2018)
Figura 24 Relazione tra deformazione assiale e numero di cicli a rottura sotto carico
ciclico a diversi carichi per (a) provini con scistosità parallela al carico, (b) provini con
scistosità perpendicolare al carico (Guo et al. 2017)
Figura 25 Tipico aspetto di provini scistosi dopo l'applicazione del carico ciclico. (a)
carico parallelo al piano di scistosità (b) carico perpendicolare al piano di scistosità, Guo
et al (2017)
Figura 26 provini di tufo in esame: (a) provini sottoposti a trazione monoassiale (b)
provini sottoposti a sforzi di trazione ciclici (Erarslan et al. 2012)
Figura 27 Superfici di campioni testati: (a) marmo, (b) arenaria (c) calcare (Nejati
2013)
Figura 28 Superficie di rottura analizzata mediante la tomografia: (a) marmo sotto
carico statico, (b) marmo sotto carico dinamico, (c) arenaria sotto carico statico, (d)
arenaria sotto carico dinamico, (e) calcare sotto carico statico, (f) calcare sotto carico
dinamico (Nejati 2013)
Figura 29 Provini di arenaria e granodiorite sottoposti a carico monotono (a) e carico
ciclico (b) (Geranmayeh e Ferdosi 2017)
Figura 30 Diminuzione della UCS e UTS al crescere del numero di cicli di gelo-disgelo
(Jia et al. 2013)
Figura 31 Diagramma che rappresenta il danno a fatica misurato mediante l'emissione
acustica
Figura 32: tipico provino inserito nelle capsule di contenimento per prova con macchina
a raggio rotante RR Moore (Jamali et al. 2017)
Figura 33: Velocità delle onde-P registrata per provini di granodiorite (a) e arenaria (b)
prima del carico e dopo gli step di carico (Geranmayeh 2020)
Figura 34: Grafico con curva sforzo deformazione per carico ciclico su granito
proveniente dalla regione di HengYang, China (Xiao et al 2008)

Figura 35: Esempio di curva S-N per materiale roccioso (Rajaram 1981)71
Figura 36: Le tre zone della curva S-N (Hosford 2010)73
Figura 37: Granito di Westerly (Rajaram 1981) prova eseguita in compressione
uniassiale, frequenza 1 Hz, con numero di cicli massimo pari a 10 ⁶ , ampiezza di carico
costante77
Figura 38: Granito di Westerly (Rajaram 1979) prova eseguita in compressione
uniassiale, frequenza 1 Hz, con numero di cicli massimo pari a 3200, ampiezza di carico
costante
Figura 39: Granito inada (Ishizuka 1990) prova eseguita in compressione uniassiale,
frequenza 0.5 Hz, con numero di cicli massimo pari a 1638200, ampiezza di carico
costante
Figura 40:Tufo (Erarslan) prova eseguita in trazione brasiliana, frequenza 1 Hz, con
numero di cicli massimo pari a 50000, ampiezza di carico costante
Figura 41: Calcare Masua (Cardu 1988) prova eseguita in compressione uniassiale,
frequenza 1 Hz, con numero di cicli massimo pari a 1370022, ampiezza di carico
costante
Figura 42: Marmo (Haimson 1971) prova eseguita in compressione uniassiale,
frequenza 2-4 Hz, con numero di cicli massimo pari a 1638200, ampiezza di carico
costante
Figura 43 Grafico S – log N per lo scisto (Guo 2018)
Figura 44 provino con piani di scistosità paralleli alla direzione del carico, a destra
provino con piani di scistosità perpendicolare alla direzione del carico
Figura 45: Valori sperimentali delle curve S-N ottenuti per le diverse rocce e graficati
secondo i differenti litotipi a cui appartengono

Tabella 1: Autori riportati e tipi di rocce analizzate	52
Tabella 2: Apparecchiature utilizzate e Tipi di prova connessi	63
Tabella 3: Misure di diametro e altezza dei provini	65
Tabella 4: Valori del diametro provini e velocità delle onde P	66
Tabella 5 Valori medi di UCS e UTS	68