Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Geotecnica TESI DI LAUREA MAGISTRALE





Studio di una caverna sotterranea appartenente ad un impianto idroelettrico: analisi dei dati di monitoraggio e modellazione numerica

Relatore: Prof.ssa Monica Barbero Candidato: Luca Sebastian Purpura

Co - Relatori: Ing. Giovanni Quaglio Dr. Giordano Russo

Anno accademico 2020/2021

Indice

Indice delle figure	3
Indice delle tabelle	8
Indice allegati	9
Abstract	11
Abstract	12
Introduzione	14
1. Impianto idroelettrico oggetto di studio	17
1.1 Cenni sugli impianti idroelettrici	17
1.2 Presentazione del caso studio	19
1.3 Sistemi di monitoraggio	21
1.3.1 Strumenti di monitoraggio utilizzati nell'impianto idroelettrico	25
2 Interpretazione dei dati di monitoraggio della Powerhouse	
2.1 Estensimetri (UP – PH)	
2.2 Estensimetri (DS – PH)	
2.3 Tiranti (UP – PH)	54
2.4 Tiranti (DS – PH)	63
2.5 Tiranti (NS – PH)	68
2.6 Osservazioni generali sulle analisi di best – fitting	74
2.6.1 Parete laterale della Powerhouse (Upstream e Downstream) estensimetri	75
2.6.2. Parete laterale della Powerhouse (Upstream e Downstream) tiranti	77
2.6.3 Parete Nord e Sud della Powerhouse tiranti	
3. Applicazione del modello di Sulem et al. (1987)	81
3.1 Cenni teorici dell'approccio di Sulem	81
3.1.1 Metodo per la stima dei parametri dell'approccio di Sulem	
4 Modellazione agli elementi finiti dell'impianto idroelettrico	
4.1 Software agli elementi finiti RS3	
4.2 Modellazione dell'impianto idroelettrico	90
4.2.1 Geometria dell'impianto idroelettrico	
4.2.2 Modello geomeccanico della Powerhouse	95
4.2.3 Mesh e condizioni al contorno	102
4.2.4 Modello dell'impianto idroelettrico con i supporti	105
4.3 Risultati dell'impianto idroelettrico	108
4.3.1 Stato tensionale	108

L. S. Purpura

4.3.2 Spostamenti totali e zone plastiche nelle pareti	.110
4.3.3 Spostamenti nel rivestimento di calcestruzzo	. 115
4.3.4 Sollecitazioni nei tiranti e nei chiodi della PH	.118
4.3.5 Interpretazione dei risultati ottenuti dalla modellazione 3D	. 121
Conclusioni	. 123
Riferimenti bibliografici	. 168
Ringraziamenti	. 171

Indice delle figure
Figura 1.2.1 Schema della centrale idroelettricapag. 19
Figura.1.2.2 Focus del cuore della centrale idroelettricapag. 20
Figura 1.3.1 Estensimetripag. 22
Figura 1.3.2 Inclinometripag. 22
Figura 1.3.3 Celle di caricopag. 23
Figura 1.3.4 Tiranti
Figura 1.3.5 Chiodipag. 25
Figura 1.3.1.1 Sistema di monitoraggio della centrale idroelettricapag. 25
Figura 1.3.1.2 Sezione upstream dello sviluppo longitudinale della Powerhouse (Estensimetri)
Figura 1.3.1.3 Sezione upstream dello sviluppo longitudinale della Powerhouse (Tiranti)pag. 27
Figura 1.3.1.4 Sezione downstream dello sviluppo longitudinale della Powerhouse (Estensimetri)
Figura 1.3.1.5 Sezione downstream dello sviluppo longitudinale della Powerhouse (Tiranti)
Figura 1.3.1.6 Sezione downstream dello sviluppo longitudinale della Powerhouse (Tiranti)
Figura 2.1.1 Parete laterale della Powerhouse (Upstream) con gli estensimetripag. 35
Figura 2.1.2 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph-L0+34-5-3pag. 36
Figura 2.1.3 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 34 - 5 - 3
Figura 2.1.4 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph-R0+24-3-4pag. 37
Figura 2.1.5 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 24 - 3 - 4
Figura 2.1.6 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph-R0+47-4-4pag. 39
Figura 2.1.7 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 47 - 4 - 4pag. 39
Figura 2.1.8 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph-R0+56-2-3pag. 40
Figura 2.1.9 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - R0 + 56 - 2 - 3
Figura 2.2.1 Parete laterale della Powerhouse (Downstream) con gli estensimetripag. 43
Figura 2.2.2 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph - $L0 + 16 - 6 - 4$ pag. 44

Figura 2.2.3 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 16 - 6 - 4
Figura 2.2.4 Dati di monitoraggio dell'estensimetro $Mph - L0 + 16 - 9 - 4$ pag. 45
Figura 2.2.5 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 16 - 9 - 4pag. 46
Figura 2.2.6 Dati di monitoraggio dell'estensimetro $Mph - R0 + 7 - 6 - 4$ pag. 47
Figura 2.2.7 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph – R0 + 7 – 6 – 4
Figura 2.2.8 Dati di monitoraggio dell'estensimetro $Mph - R0 + 7 - 8 - 4$ pag. 48
Figura 2.2.9 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph – R0 + 7 – 8 – 4
Figura 2.2.10 Dati di monitoraggio dell'estensimetro $Mph - R0 + 47 - 5 - 4pag$. 50
Figura 2.2.11 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph – R0 + 47 – 5 – 4
Figura 2.2.12 Dati di monitoraggio dell'estensimetro $Mph - R0 + 47 - 8 - 4$ pag. 51
Figura 2.2.13 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph – L0 + 47 – 8 – 4pag. 52
Figura 2.3.1 Parete laterale della Powerhouse (Upstream) con i tirantipag. 54
Figura 2.3.2 Dati di monitoraggio del tirante DPph-21-R52Upag. 55
Figura 2.3.3 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 21 - R52Upag. 55
Figura 2.3.4 Dati di monitoraggio del tirante DPph-35-R0Upag. 56
Figura 2.3.5 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 35 – R0Upag. 56
Figura 2.3.6 Dati di monitoraggio del tirante DPph-50-R22Upag. 57
Figura 2.3.7 Forza attesa in funzione del tempo del tirante $DPph - 50 - R22Upag. 57$
Figura 2.3.8 Dati di monitoraggio del tirante DPph-73-L27Upag. 58
Figura 2.3.9 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 73 – L27Upag. 59
Figura 2.3.10 Dati di monitoraggio del tirante DPph-505-R56Spag. 60
<i>Figura 2.3.11 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 505 – R56Spag. 60</i>
Figura 2.3.12 Dati di monitoraggio del tirante DPph-512-L23Upag. 61
Figura 2.3.13 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 512 – L23Upag. 62
Figura 2.4.1 Parete laterale della Powerhouse (Downstream) con i tirantipag.63
Figura 2.4.2 Dati di monitoraggio del tirante DPph-508-R47Dpag. 64

Figura 2.4.3 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 508 – R47Dpag. 64
Figura 2.4.4 Dati di monitoraggio del tirante DPph-722-L13Dpag. 65
<i>Figura 2.4.5 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 722 – L13Dpag. 66</i>
Figura 2.5.1 Parete Nord e Sud della Powerhouse con i tirantipag. 68
Figura 2.5.2 Dati di monitoraggio del tirante DPph-125-R56Spag. 69
Figura 2.5.3 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 125 – R56Spag. 69
Figura 2.5.4 Dati di monitoraggio del tirante DPph-137-L34Npag. 70
Figura 2.5.5 Forza attesa in funzione del tempo del tirante $DPph - 137 - L34Npag$. 71
Figura 2.5.6 Dati di monitoraggio del tirante DPph-210-L34Npag. 72
Figura 2.5.7 Forza attesa in funzione del tempo del tirante $DPph - 210 - L34Npag$. 72
Figura 2.6.1 Rappresentazione 3D dell'impianto idorelettricopag. 74
Figura 2.6.1.1 Parete laterale della Powerhouse (Upstream) con gli estensimetri
Figura 2.6.1.2 Parete laterale della Powerhouse (Downstream) con gli estensimetri
Figura 2.6.2.1 Parete laterale della Powerhouse (Upstream) con i tirantipag. 77
Figura 2.6.2.2 Parete laterale della Powerhouse (Downstream) con i tiranti
Figura 2.6.3.1 Parete Nord e Sud della Powerhouse con i tiranti
Figura 3.1.1 1 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 34 - 5 - 3pag. 83
Figura 3.1.1.2 Spostamento atteso calcolato tramite il metodo di Sulem dell'estensimetro Mph - L0 + 34 - 5 - 3pag. 83
Figura 3.1.1.3 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - R0 + 47 - 8 - 4
Figura 3.1.1.4 Spostamento atteso calcolato tramite il metodo di Sulem dell'estensimetro Mph – R0 + 47 - 8 – 4pag. 85
Figura 4.2.1.1 Stage 1pag. 90
Figura 4.2.1.2 Stage 2pag. 91
Figura 4.2.1.3 Stage 3pag. 91
<i>Figura 4.2.1.5 Stage 4pag. 92</i>
<i>Figura 4.2.1.6 Stage 5pag. 92</i>
<i>Figura 4.2.1.7 Stage 6pag. 93</i>
Figura 4.2.1.8 Stage 7pag. 93
Figura 4.2.1.9 Stage 8pag. 94

<i>Figura 4.2.1.10 Stage 9pag. 94</i>	
Figura 4.2.2.1 Sezione geologica upstream della Powerhousepag. 95	
Figura 4.2.2.2 Sezione geologica downstream della Powerhousepag. 96	
Figura 4.2.2.3 Profilo di longitudine geologica dell'asse del Powerhousepag. 96	
Figura 4.2.2.4 Modello geologico tridimensionale della litologia della central elettricapag. 97	e
Figura 4.2.2.5 Modello geologico tridimensionale della centrale elettrica (classe V)pag. 97	
Figura 4.2.2.6 Linearizzazione del criterio di Hoek – Brownpag. 98	
Figura 4.2.2.7 Leggi costitutivepag. 100	
Figura 4.2.2.8 Modello 3D dell'impianto idroelettricopag. 101	
Figura 4.2.3.1 Meshpag. 103	
Figura 4.2.3.2 Condizioni al contornopag.104	
Figura 4.2.4.1 Modello geometrico dell'impianto idroelettrico con i supporti (tiranti e rivestiment di cls)pag. 105	0
Figura 4.2.4.2 Modello con i sistemi di supporti (tiranti e rivestimento del calcestruzzo) delle Powerhouse e della Transformer hall	а
Figura 4.2.4.3 Tendons - bar anchorspag. 106	
Figura 4.2.4.4 Rock Dowelspag. 107	
Figura 4.3.1.1 Stato tensionale: σ 1pag. 108	
Figura 4.3.1.2 Stato tensionale: σ^2	
Figura 4.3.1.3 Stato tensionale: σ 3pag. 109	
Figura 4.3.2.1 Spostamenti sulle pareti upstream – sud della PHpag. 110	
Figura 4.3.2.2 Spostamenti sulle pareti downstream – sud della PHpag. 111	
Figura 4.3.2.3 Spostamenti sulle pareti downstream – nord della PHpag. 111	
Figura 4.3.2.4 Spostamenti sulle pareti upstream – nord della PHpag. 112	
Figura .3.2.5 Zone plastiche sulle pareti upstream – sud della PHpag. 112	
Figura 4.3.2.6 Zone plastiche sulle pareti downstream – sud della PHpag. 113	
Figura 4.3.2.7 Zone plastiche sulle pareti downstream – nord della PHpag. 113	
Figura 4.3.2.8 Zone plastiche sulle pareti upstream – nord della PHpag. 114	
Figura 4.3.3.1 Spostamenti del lining sulle pareti upstream – sud della PHpag. 115	
Figura 4.3.3.2 Spostamenti del lining sulle pareti downstream – sud della PHpag. 116	

Indice delle tabelle
Tabella 2.1.1 Riepilogo dei dati degli spostamenti attuali (Giugno) ed attesi per ogni fitting effettuato
(Upstream)pag. 42
Tabella 2.2.1 Riepilogo dei dati degli spostamenti attuali (Giugno) ed attesi per ogni fitting effettuato(Downstream)
Tabella 2.3.1 Riepilogo dei dati di sollecitazione (Giugno) ed attesi per ogni fitting effettuato (Upstream)pag. 62
Tabella 2.4.1 Riepilogo dei dati di sollecitazione (Giugno) ed attesi per ogni fitting effettuato(Downstream)pag. 67
Tabella 2.5.1 Riepilogo dei dati di sollecitazione (Giugno) ed attesi per ogni fitting effettuato (Nord- Sud)pag. 73
Tabella 3.1.1.1 Parametri incogniti del metodo di Sulem dell'estensimetro Mph - L0 + 34 - 5 - 3
Tabella 3.1.1.2 Parametri incogniti del metodo di Sulem dell'estensimetro Mph - R0 + 47 - 8 - 4pag. 85
Tabella 4.2.2.1 Parametri geomeccanici pag. 100
Tabella 4.2.2.2 Parametri delle faglie pag. 100

Indice allegati

Allegato 1 Dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle anali	isi di best – fitting degli estensimetri della
parete upstream della PH	pag. 128
Allegato 2 Dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle anali	isi di best – fitting degli estensimetri della
parete downstream della PH	pag. 136
Allegato 3 Dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle anal	lisi di best – fitting dei tiranti della parete
upstream della PH	pag. 148
Allegato 4 Dati di monitoraggio scaricati ed i parametri dati della	e analisi di best – fitting dei tiranti della
parete downstream della PH	pag. 158
Allegato 5 Dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle ana	lisi di best – fitting dei tiranti delle pareti
nord e sud della PH	pag. 162

Abstract

Il presente elaborato di tesi riporta lo studio di stabilità di una centrale idroelettrica sulla base di misure derivanti da un sistema di monitoraggio.

L'impianto idroelettrico oggetto di analisi è composto dalla caverna *Penstock Branches*, dove confluisce l'acqua dal bacino superiore, dalle due caverne fondamentali contenenti le turbine ed i trasformatori, rispettivamente *Powerhouse* e *Transformer Hall*, dalle caverne di connessione *Busbar Tunnel*, *Old* e *New Main Acces Tunnel* e dalle restanti caverne *Pilot Tunnels*, e *Draft Tubes*. La costruzione dell'impianto idroelettrico è iniziata orientativamente nel 2018 ed ancora oggi vi sono interventi in corso in varie parti delle caverne di collegamento.

Lo studio della stabilità della *Powerhouse*, inizialmente, viene eseguito effettuando delle analisi di best – fitting su dei dati di monitoraggio derivanti da strumenti (estensimetri e celle di carico), installati lungo le pareti upstream, downstream, nord e sud. Le leggi matematiche utilizzate per effettuare le analisi di best – fitting, realizzate tramite l'ausilio del software *OriginLab*, sono due: esponenziale e potenza. La prima, esponenziale, indica un andamento stabile delle misure strumentali nel tempo, mentre quella di potenza, un andamento instabile. Successivamente, si applica il modello proposto da *Sulem et al. (1987)* che consente di stimare la convergenza di un tunnel con sezione circolare, con roccia intorno al tunnel omogenea ed isotropa, e scavo profondo da considerare che la distribuzione delle tensioni è omogenea, distinguendo gli spostamenti indotti dall'avanzamento dello scavo da quelli dipendenti dal tempo. Per ricavare i parametri incogniti del modello, si utilizzano le letture ricavate da due estensimetri collocati sulla parete upstream e downstream della *Powerhouse*. Infine, si procede alla modellazione numerica tridimensionale agli elementi finiti dell'impianto idroelettrico in analisi, usando il programma (*RS3* di Rocscience) al fine di stimare la risposta tensio-deformativa dell'ammasso roccioso e la risposta struttura dei supporti (tiranti e rivestimento del cls).

Abstract

This thesis paper reports the stability study of a hydroelectric power plant based on measurements from a monitoring system.

The hydroelectric plant is composed by the Penstock Branches cave, where water flows from the upper reservoir, the two fundamental caves containing the turbines and transformers, respectively Powerhouse and Transformer Hall, from the Busbar Tunnel, Old and New Main Acces Tunnel connection caves and the remaining Pilot Tunnels, and Draft Tubes caves. The construction of the hydroelectric plant began in 2018 and still today there are interventions in various parts of the connecting caves.

The stability study of Powerhouse, initially, is carried out by performing best - fitting analyses on monitoring data derived from instruments (extensometers and load cells), installed along upstream, downstream, north and south walls. The mathematical laws used to carry out the best - fitting analyses, carried out with the aid of the Originlab software, are two: exponential and power. The first, exponential, indicates a stable trend of instrumental measurements over time, while that of power, an unstable trend. Subsequently, the model proposed by Sulem et al. (1987) which allows to estimate the convergence of a tunnel with circular section, with rock around the homogeneous and isotropic tunnel, and deep excavation to consider that the tension distribution is homogeneous, distinguishing the movements induced by the advancement of the excavation from those dependent on time. To derive the unknown parameters of the model, we use the readings obtained from two extensometers placed on the upstream and downstream wall of Powerhouse. Finally, three-dimensional numerical modeling of the finite elements of the hydroelectric plant is carried out in analysis, using the program (RS3 by Rocscience) in order to estimate the tensile-deformative response of the rock mass and the structural response of the supports (load cells and CLS lining).

Introduzione

Il presente elaborato di tesi riporta lo studio di stabilità di una centrale idroelettrica (*Powerhouse*) sulla base di misure derivanti da un sistema di monitoraggio.

L'impianto idroelettrico oggetto di analisi è composto dalla caverna *Penstock Branches,* dove confluisce l'acqua dal bacino superiore, dalle due caverne fondamentali contenenti le turbine ed i trasformatori, rispettivamente *Powerhouse* e *TrasformerHall*, dalle caverne di connessione *Busbar Tunnel, Old e New Main Acces Tunnel* e dalle restanti caverne *Pilot Tunnels*, e *Draft Tubes*. La costruzione dell'impianto idroelettrico è iniziata orientativamente nel 2018 ed ancora oggi, vi sono ulteriori interventi in corso in varie parti delle caverne di collegamento.

L'elaborato è suddiviso in quattro capitoli:

- 1. Nel capitolo 1, *Impianto idroelettrico oggetto di studio*, dopo una breve descrizione delle componenti di un impianto idroelettrico, si illustra l'impianto oggetto di studio, ponendo particolare attenzione al sistema di monitoraggio presente, costituito da estensimetri, inclinometri, celle di carico e prismi;
- 2. Nel capitolo 2, Interpretazione dei dati di monitoraggio della Powerhouse, si illustrano i dati forniti da alcuni strumenti scelti per il controllo della risposta tensionale e deformativa dell'ammasso roccioso sede della realizzazione delle caverne. Si sono scelti 10 estensimetri e 11 tiranti per ogni parete della Powerhouse; tale scelta si è basata su estensimetri e tiranti ad una stessa quota al fine di studiare la sua stabilità.

Il periodo di osservazione delle misure considerate è compreso tra ottobre 2020 e giugno 2021. Al fine di avere una stima della stabilità o potenziale instabilità delle misure dii ogni strumento, si effettuano delle analisi di best – fitting tramite l'ausilio del software *OriginLab* utilizzando due leggi: esponenziale e potenza. Per ogni sistema di monitoraggio è stata dunque condotta una analisi di best – fitting a partire dal mese di febbraio a giugno, considerando i dai dati di monitoraggio a partire da ottobre al fine di avere più dati a disposizione e quindi maggiore affidabilità dei risultati delle analisi effettuate. Dunque, si studia globalmente la stabilità o instabilità di ogni parete della *Powerhouse* tenendo in considerazione le possibili cause ed aspetti che potrebbero influenzare in fattore negativo o positivo la stabilità stessa;

- 3. Nel capitolo 3, *Modello di Sulem et al. (1987)*, si considera il modello proposto da *Sulem et al. (1987)*, che consente di stimare la convergenza di un tunnel con sezione circolare, con roccia intorno al tunnel omogenea ed isotropa, e scavo profondo considerando che la distribuzione delle tensioni è omogenea, distinguendo gli spostamenti indotti dall'avanzamento dello scavo da quelli dipendenti dal tempo. Tale modello permette, infatti, di tenere in conto, tramite il calcolo della convergenza, sia l'effetto di allontanamento del fronte ($C_1(x)$), sia il comportamento tempo-dipendente del mezzo sottoposto allo scavo ($C_2(t)$). Per far ciò, si effettua una stima dei parametri incogniti del modello tramite validazione con misure reali focalizzandosi solo sulla parte legata al comportamento tempo-dipendente del mezzo sottoposto allo scavo confrontando gli andamenti ottenuti tramite questo modello con le analisi di best fitting. Il modello viene applicato solo su due estensimetri localizzati sulla parete upstream e downstream della *Powerhouse* con comportamento, rispettivamente, stabile ed instabile in modo tale da far risalire le eventuali differenze.
- 4. Nel capitolo 4, *Modellazione 3D agli elementi finiti dell'impianto idroelettrico*, viene modellato l'impianto idroelettrico con l'ausilio del software *RS3* che implementa il Metodo degli Elementi Finiti in campo tridimensionale. Si descrivono dunque le diverse fasi di creazione del modello e si riportano i risultati in termini di variazione dello stato tensionale, spostamenti totali ed eventuali zone plastiche nelle pareti upstream, downstream, nord e sud della *Powerhouse* e di risposta strutturale dei supporti (tiranti e rivestimento in calcestruzzo).

1. Impianto idroelettrico oggetto di studio

1.1 Cenni sugli impianti idroelettrici

Nell'universo si è a lungo utilizzata l'energia dell'acqua per azionare macchinari. Infatti, fino ad oggi, l'energia idroelettrica rimane una fonte significativa di energia elettrica in tutto il mondo. Per garantire sicurezza ed efficienza, le moderne centrali idroelettriche si affidano ad una serie di strumenti di misura per monitorare livello, portata, pressione e temperatura durante i processi.

Per migliaia di anni l'acqua è stata la principale fonte di energia per gestire sistemi di macinazione dei cereali, irrigazione dei campi e lavorazione del legname. Alla fine del 1800, le persone hanno iniziato a utilizzare l'energia idroelettrica per generare elettricità. La prima grande centrale idroelettrica italiana venne attivata nel 1895 a Paderno, costruita sull'Adda da Edison, società nata nel 1884 dal Comitato di Giuseppe Colombo, che aveva già creato nel 1883 a Milano la prima centrale termica destinata a illuminare la città. I continui miglioramenti hanno reso le centrali idroelettriche più sicure e più efficienti.

In generale, una moderna centrale idroelettrica può essere composta da un bacino idrico, una diga, condotte forzate, turbine e generatori. Il bacino immagazzina il "carburante" e consente agli operatori di controllare quanta acqua viene alimentata alle turbine. L'acqua proveniente dal bacino viene convogliata alle turbine attraverso una condotta forzata. Un sistema di filtraggio in ingresso pulisce ulteriormente l'acqua per garantire che sia relativamente priva di solidi sospesi, che potrebbero danneggiare le pale della turbina. I sistemi idraulici, come il regolatore, i freni, i comandi della saracinesca ed altri sistemi, lavorano insieme per aprire e chiudere le saracinesche che consentono all'acqua di fluire a valle del bacino. La turbina converte l'energia cinetica del movimento o della caduta dell'acqua in energia meccanica.

La turbina è collegata a sua volta con un'altra macchina, così il suo movimento mette in azione anche la macchina alla quale essa è collegata. Questa macchina è l'alternatore. L'alternatore è una macchina in grado di trasformare in energia elettrica la forza che la turbina gli trasmette con il movimento. Dunque, l'alternatore è la macchina che produce energia elettrica. Prima di essere convogliata nelle linee di trasmissione che la trasporteranno ai luoghi di utilizzazione, la corrente elettrica passa attraverso uno speciale apparecchio, che prende il nome di trasformatore.

Le centrali idroelettriche risultano essere utili, efficienti e flessibili in quanto permettono di variare rapidamente la produzione di energia elettrica in base alla quantità di acqua che si fa arrivare alla turbina; questo consente di intervenire rapidamente in caso sia necessario ripristinare l'equilibrio della rete elettrica. Inoltre, un impianto idroelettrico è incredibilmente veloce poiché può iniziare a produrre in un tempo quantificabile in minuti e dal punto di vista ambientale è idoneo visto che vi sono emissioni zero di CO2.

Nonostante, come letto precedentemente, l'energia sia particolarmente vantaggiosa per l'ambiente, essa, purtroppo, possiede alcuni aspetti negativi dove è necessario fare dell'attenzione prima di progettare questa tipologia di impianti.

I principali svantaggi dell'energia idroelettrica sono:

- *Cambiamenti ambientali,* dove la presenza di agenti atmosferici rende il funzionamento delle centrali idroelettriche piuttosto sensibile ai cambiamenti climatici ed alla variazione delle condizioni meteorologiche. Inoltre, anche la costruzione di dighe e di condotte forzate, oltre a causare una perdita della parte ambientale, avvia possibili cambiamenti ambientali che si riflettono su flora e fauna. Così come, soprattutto in prossimità dei fiumi, la costruzione degli impianti genera la scomparsa di alcune specie di pesci, in particolare salmoni, che non riescono a depositare le uova durante la migrazione. Un altro problema potrebbe essere legato alla rumorosità dell'impianto qualora vi siano abitazioni adiacenti.
- *Presenza di sostanze chimiche,* dove oltre a rappresentare un pericolo per l'ecosistema, le centrali idroelettriche possono danneggiare anche quelli dei letti dei fiumi a causa dei bassi livelli di ossigeno disciolti nell'acqua. Le dighe, inoltre, possono provocare fenomeni di erosione costiera bloccando il trasporto di materiali solidi come ghiaia e sabbia.

Dunque, si può affermare che, l'utilizzo delle risorse idriche rappresenta una soluzione vantaggiosa su cui investire per salvaguardare la salute del pianeta e per la produzione di energia pulita. Tuttavia, proprio a causa degli svantaggi legati alla costruzione di centrali idroelettriche, è necessario saper combinare i vari aspetti di un impianto con particolare attenzione all'ambiente circostante per fare in modo che l'energia idroelettrica diventi una valida risorsa per l'umanità.

1.1 Presentazione del caso studio

In Figura 1.2.1 si riporta l'impianto idroelettrico, oggetto del seguente studio, composto da

- Un serbatoio superiore (Upper Reservoir) ed uno inferiore (Lower Reservoir);
- Tunnel di testa (*Headrace Tunnel*);
- Pozzo di sovratensione (*Upper Surge Shaft*);
- Pozzo della condotta forzata (*Penstock shaft*);
- Centrale idroelettrica (*Powerhouse*);
- Pozzo di sottotensione (*Lower Surge Shaft*);
- Accesso al Tunnel (*Access Tunnel*);
- Tunnel di coda (*Tailrace Tunnel*).

Come già accennato, l'acqua proveniente dal serbatoio superiore (*Upper Reservoir*) convoglia nella centrale idroelettrica (*Powerhouse*), nella quale vi sono le turbine, tramite il pozzo della condotta forzata (*Penstock shaft*). Nella *Powerhouse*, dunque, le turbine convertono l'energia cinetica del movimento o della caduta dell'acqua in energia meccanica. Le turbine sono collegate a sua volta con un'altra macchina, così il suo movimento mette in azione anche la macchina alla quale essa è collegata (*Alternatore*) che è in grado di trasformare in energia elettrica la forza che la turbina gli trasmette con il movimento. Prima di essere convogliata nelle linee di trasmissione che la trasporteranno ai luoghi di utilizzazione, la corrente elettrica passa attraverso uno speciale apparecchio, che prende il nome di trasformatore (*Transformer Hall*).



Figura 1.2.1 Schema della centrale idroelettrica

In particolare, in *Figura 1.2.2*, si riporta un focus del cuore dell'impianto idroelettrico composto dalla caverna *Penstock Branches*, dove confluisce l'acqua dal bacino superiore, dalle due caverne fondamentali contenenti le turbine ed i trasformatori, rispettivamente *Powerhouse* e *Transformer Hall*, dalle caverne di connessione *Busbar Tunnel*, *Old e New Main Acces Tunnel* e dalle restanti caverne *Pilot Tunnels*, e *Draft Tubes*.



Figura.1.2.2 Focus del cuore della centrale idroelettrica

Di fondamentale importanza, al fine di avere un buon funzionamento dell'impianto idroelettrico, è la stabilità di esso dal punto di vista geo-meccanico. Nel capitolo seguente si introducono i sistemi di monitoraggio installati nell'impianto, con le sezioni della *Powerhouse* oggetto di studio.

1.3 Sistemi di monitoraggio

La strumentazione di monitoraggio risulta essere fondamentale al fine di effettuare un controllo su opere esistenti o in corso di realizzazione e di determinare i parametri di interesse geotecnico, nella prima fase conoscitiva, in vista del progetto di opere da insediarsi sul territorio. In fase di realizzazione di un'opera tale strumentazione può essere utilizzata per valutare se sono soddisfatte le condizioni di stabilità. In particolare, il sistema di monitoraggio è utilizzato per le seguenti principali tre finalità:

- valutare le condizioni di stabilità attuali e future mediante lo studio e la previsione dell'evoluzione dei movimenti e degli sforzi;
- utilizzare sistemi di allerta e di allarme;
- scegliere i più opportuni sistemi di consolidamento.

In particolare, la prima finalità è utile al fine di visionare tramite i dati di monitoraggio la stabilità a lungo termine delle caverne sotterrane. Mediante la messa in opera di strumenti di adeguate caratteristiche, come estensimetri, inclinometri, prismi, celle di carico, tiranti, chiodi ed altri sistemi di monitoraggio, è possibile controllare gli spostamenti superficiali e profondi, l'eventuale apertura di fratture e fessure, eventuali stati di sforzo sulle strutture presenti nelle aree di studio, al fine di tenere sotto controllo sia le azioni capaci di produrre instabilità che i corrispondenti comportamenti delle opere. Il controllo continuo di queste ultime consente di decidere le più opportune azioni da intraprendere per garantire la stabilità ed una buona progettazione delle opere in esame. Di seguito, vengono illustrati gli strumenti prima citati:

• Estensimetri, riportati in *Figura 1.3.1*, sono degli strumenti che misurano gli spostamenti relativi tra due o più punti lungo una direzione rispetto ad un punto fisso di riferimento. Sono installati in fori di sondaggio e rilevano gli spostamenti a diverse profondità. I punti di riferimento sono realizzati da appositi ancoraggi bloccati nella perforazione alle profondità desiderate attraverso cementazione o con dispositivi speciali. Le aste di misura sono solidali ai punti di ancoraggio che collegano, idealmente, alla testa di riferimento, che a sua volta realizza il punto da controllare; dette aste sono rivestite da una guaina protettiva che le isola dal terreno circostante o dalla boiacca di riempimento e ne garantisce la libertà di scorrimento. Le aste, libere di scorrere all'interno della guaina, consentono quindi la misura dei movimenti relativi fra il punto di ancoraggio e la testa di riferimento installata in superficie.

La misura viene effettuata in maniera manuale a mezzo di un calibro o un comparatore analogico o digitale o a mezzo di sensori di spostamento automatici (potenziometri, LVDT o corda vibrante) e la misura effettuata è resa assoluta dalla certezza della stabilità del punto di riferimento o dalla misura, con altro metodo, del punto accessibile (testa dello strumento).



Figura 1.3.1 Estensimetri

Inclinometri, illustrati in *Figura 1.3.2*, sono degli strumenti che misurano gli spostamenti laterali, cioè gli spostamenti nella direzione ortogonale al loro asse. Consistono in una serie di sonde installate all'interno di un tubo inclinometrico posto in un foro di sondaggio, che consentono di rilevare l'inclinazione locale per definire l'entità degli spostamenti sia locali che integrali lungo tutto il tubo. Gli inclinometri vengono comunemente installati a profondità tali da consentire di ritenere fisso il punto più profondo, e collegati ad un sistema di acquisizione automatico per la gestione automatica del sistema.



Figura 1.3.2 Inclinometri

• Celle di carico, rappresentate in *Figura 1.3.3*, sono degli strumenti utili per misurare il carico o la pressione all'interno di un elemento strutturale (per esempio il rivestimento di una galleria, i tiranti ecc) in cui sono inserite, al fine di monitorare la struttura stessa.



Figura 1.3.3 Celle di carico

• Tiranti, illustrati in *Figura 1.3.4*, sono sistemi attivi strutturali di stabilizzazione e sono utilizzati per ancorare al terreno paratie o muri di sostegno, per stabilizzare pareti rocciose o per consolidare volte di gallerie. L'armatura dei tiranti di ancoraggio è costituita da una barra metallica o da un fascio di trefoli in acciaio resa solidale al terreno mediante iniezioni cementizie nella zona di ancoraggio (bulbo); essa viene pre-sollecitata a trazione e quindi collegata alla struttura da ancorare tramite una piastra di reazione. In tal modo si genera una sollecitazione di compressione negli strati di terreno retrostanti. Le parti principali del tirante sono: la testata, costituita, in genere, da una piastra e dal relativo dispositivo di bloccaggio, la parte libera che serve solo alla trasmissione del carico, la fondazione che è la parte lungo la quale il carico viene trasferito al terreno e le guaine di protezione, le quali sono sempre presenti in corrispondenza della parte libera.



Figura 1.3.4 Tiranti

Chiodi, riportati in *Figura 1.3.5*, sono sistemi passivi strutturali di stabilizzazione e sono utilizzati solo quando solo quando il volume instabile si muove aumentando la resistenza del materiale al fine di stabilizzare pendii, scavi e pareti rocciose come pure muri di sostegno con deformazioni contenute. Il sistema portante differisce in modo significativo da quello dei tiranti attivi e dai micropali a trazione. Nel caso delle chiodature la capacità portante del terreno è incrementata dai chiodi stessi. Il terreno è inchiodato in zone stabili poste in sicurezza rispetto alla superficie di scorrimento. Forze di trazione e taglio agiscono sui chiodi che vanno installati a distanze ridotte tra loro. I chiodi non agiscono singolarmente, ma come insieme completo.



Figura 1.3.5 Chiodi

1.3.1 Strumenti di monitoraggio utilizzati nell'impianto idroelettrico

I sistemi di monitoraggio installati nelle varie componenti dell'impianto idroelettrico sono riportati in *Figura* 1.3.1.1, dove si possono notare *Estensimetri, Carichi di tensione, Tiranti, Prismi, Metro comune* ed *Inclinometri* per ogni area (*PH, TFH, BST/MAT* e *LSS*), ed il numero totale di essi. Tali sistemi di monitoraggio sono governati da due software in tempo reale.



Figura 1.3.1.1 Sistema di monitoraggio della centrale idroelettrica

Focalizzandosi sulla *Powerhouse*, oggetto di studio del seguente lavoro, gli strumenti considerati sono alcuni specifici estensimetri e tiranti utili per studiare la stabilità globale della caverna tramite le analisi di *best – fitting* illustrate nel capitolo seguente. I dati di monitoraggio forniti dalla strumentazione sono stati scaricati su un software ed osservati a partire da inizio ottobre fino a giugno 2021. Nelle *Figure 1.3.1.2 – 1.3.1.6* sono riportate le sezioni della *Powerhouse*:

- Upstream, sezione dello sviluppo longitudinale della Powerhouse, con le caverne Penstock Branches. (Figura 1.3.1.2 e Figura 1.3.1.3)
- Downstream, sezione dello sviluppo longitudinale della Powerhouse, con le caverne Busbar Tunnels e Draft Tubes. (Figura 1.3.1.4 e Figura 1.3.1.5)
- North Sud, le due facce della Powerhouse. (Figura 1.3.1.6)



Figura 1.3.1.2 Sezione upstream dello sviluppo longitudinale della Powerhouse (Estensimetri)



Figura 1.3.1.3 Sezione upstream dello sviluppo longitudinale della Powerhouse (Tiranti)



Figura 1.3.1.4 Sezione downstream dello sviluppo longitudinale della Powerhouse (Estensimetri)



Figura 1.3.1.5 Sezione downstream dello sviluppo longitudinale della Powerhouse (Tiranti)



Figura 1.3.1.6 Sezione downstream dello sviluppo longitudinale della Powerhouse (Tiranti)

2 Interpretazione dei dati di monitoraggio della Powerhouse

I dati di monitoraggio, oggetti del seguente studio, risultano essere gli estensimetri e tiranti lungo lo sviluppo longitudinale (Upstream e Downstream) e le due facce (North – Sud) della *Powerhouse*, illustrati nella *Figura 1.3.1* del *capitolo 1.2*. Attraverso tali dati di monitoraggio sono state effettuate delle analisi di best-fitting, mediante l'ausilio del software *OriginLab*. Le analisi di best-fitting, eseguite mediante opportuni modelli matematici, sono utili per individuare l'andamento dei dati di monitoraggio nel tempo, consentendo di formulare delle osservazioni a scopo previsionale. Nel presente lavoro di tesi si sono considerate la *legge esponenziale* e la *legge di potenza:* la prima indica se vi è nel tempo una stabilizzazione dei dati di misura, la seconda se vi è in stabilizzazione. Le rispettive formulazioni matematiche sono le seguenti:

• Legge esponenziale (exp): $y = A1 \cdot e^{\left(\frac{-x}{t_1}\right)} + y0$ (eq. 1)

dove y è il valore dello spostamento o forza da calcolare, x è il tempo noto, espresso in giorni, AI è una costante, tI è il tempo espresso in giorni e y0 è il valore dello spostamento o forza;

• Legge di potenza (power): $y = a \cdot x^b + c$ (eq. 2)

dove y è il valore dello spostamento o forza da calcolare, x è il tempo noto, espresso in giorni, a e b sono due costanti e c è il valore dello spostamento o forza.

Il software restituisce le costanti A1, t1, y0, a, b, c, il coefficiente di determinazione R-squared (R^2) ed il coefficiente di determinazione nella forma "corretta" Adj. R-squared.

Il coefficiente R^2 è una misura statistica che rappresenta la proporzione della varianza per una variabile dipendente che viene spiegata da una o più variabili indipendenti in un modello di regressione. Il calcolo effettivo di R^2 richiede diversi passaggi; in particolare, questo include la raccolta di punti di misure di variabili dipendenti e indipendenti e la ricerca della linea/curva interpolatrice più adatta, generalmente da un modello di regressione. Da qui, si calcolano i valori attesi, a questi si sottraggono i valori reali e, infine, si eleva al quadrato il risultato. In questo modo si ottiene un elenco di errori al quadrato, che viene poi sommato ed è uguale alla varianza. La varianza fornisce una misura della variabilità dei valori assunti dalla variabile stessa; in particolare, indica la misura di quanto essi, i valori assunti della variabile stessa, si discostino quadraticamente rispettivamente dalla media aritmetica o dal valore atteso. Per calcolare la varianza totale, si sottrae il valore reale medio dai valori previsti, si quadra il risultato e poi si somma.

Successivamente, si divide la prima somma degli errori (varianza spiegata) per la seconda somma (varianza totale), dopo si sottrae il risultato da uno e si ottiene il coefficiente di determinazione *R-squared*. Pertanto, se R^2 di un'analisi è 0,50, significa che circa la metà della variazione osservata può essere spiegata dagli input dell'analisi.

Di seguito si riporta l'equazione per calcolare R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \qquad (eq. 3)$$

con *SSE*, somma spiegata dei quadrati, che è data dalla somma delle differenze tra i valori misurati ed i valori attesi al quadrato e *TSS*, somma totale dei quadrati, che è, invece, data dalla somma delle differenze tra i valori misurati e la media della stessa variabile.

Il coefficiente di determinazione nella forma "corretta" *Adj. R-squared,* è una versione modificata dell' R^2 classico ed è utilizzato per facilitare l' R^2 così che aggiungendo dei dati, l'aumento del valore del coefficiente di determinazione sia realmente un miglioramento dell'analisi e non solo effetto numerico che sovrastima la bontà di adattamento. Il vantaggio del coefficiente di determinazione corretto è che trova positivamente l'aggiunta di nuovi dati solo quando questi consentono un buon miglioramento del modello. Di seguito si riporta la formulazione matematica del *Adj. R-squared*:

$$Adj. R^{2} = 1 - \left[\left(\frac{n-1}{n-k-1} \right) \cdot \left(\frac{SSE}{SST} \right) \right]$$
(eq. 4)

dove n è la numerosità campionaria e k è il numero dei nuovi dati.

Le costanti *A1, t1, y0, a, b* e *c* sono ottenute mediante il software *OriginLab*, basandosi sui dati di monitoraggio; conoscendo le costanti, si implementano le equazioni 1 e 2 su *Excel* e, di conseguenza, si ottengono i diagrammi delle analisi, sotto riportati, per ogni sezione della *Powerhouse*.

In particolare, i dati di monitoraggio sono stati scaricati da un software, che governa in tempo reale i dati di monitoraggio, ad inizio ottobre 2020 e si è ritenuto opportuno, dopo le iniziali analisi, considerare i primi 3 mesi di letture ed effettuare la prima analisi di best - fitting con riferimento al mese di febbraio 2021. Successivamente, si sono aggiornati i dati di monitoraggio e si sono eseguite le analisi con riferimento ai mesi di marzo, aprile, maggio e giugno 2021, al fine di verificare l'attendibilità previsionale della legge interpretativa considerata. Gli estensimetri ed i tiranti sono stati selezionati lungo le pareti della *Powerhouse* ad una stessa quota al fine di avere, dopo le analisi, una visione puntuale e globale del comportamento atteso in termini di spostamenti e forze.

Gli strumenti selezionati sono 10 estensimetri: *Mph-L0+34-5-3, Mph-R0+24-3-4, Mph-R0+47-4-4, Mph-R0+56-2-3, Mph-L0+16-6-4, Mph-L0+16-9-4, Mph-R0+07-6-4, Mph-R0+07-8-4, Mph-R0+47-5-4, Mph-R0+47-8-4* e 11 tiranti: *DPph-21-R52U, DPph-35-R0U, DPph-50-R22U, DPph-73-L27U, DPph-505-R56S, DPph-512-L23U, DPph-508-R47D, DPph-722-L13D, DPph-125-R56S, DPph-137-L34N* e *DPph-210-L34N*) e nei paragrafi che seguono si riportano le analisi di best-fitting effettuate e delle osservazioni globali:

- 2.1 Estensimetri (UP PH);
- 2.2 Estensimetri (DS PH);
- 2.3 Tiranti (UP PH);
- 2.4 Tiranti (DS PH);
- 2.5 Tiranti (NS PH).
- 2.6 Osservazioni generali sulle analisi di best fitting
2.1 Estensimetri (UP – PH)

In *Figura 2.1.1* si riportano i quattro estensimetri (*Mph-L0+34-5-3*, *Mph-R0+24-3-4*, *Mph-R0+47-4-4* e *Mph-R0+56-2-3*) selezionati sulla sezione *Upstream* della *Powerhouse*, indicati con il riquadro in rosso.



Figura 2.1.1 Parete laterale della Powerhouse (Upstream) con gli estensimetri

Di seguito, si riportano i risultati delle analisi di best – fitting effettuate con le due leggi esponenziale (eq. 1) e di potenza (eq. 2) tramite il software *OriginLab*, prestando particolare attenzione alla stabilità dei dati di monitoraggio nel tempo analizzando ogni dato di monitoraggio selezionato.

In *Figura 2.1.2* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.1.3* le analisi di best-fitting dell'estensimetro *Mph-L0+34-5-3*.



Figura 2.1.2 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph-L0+34-5-3

Al fine di dedurre in maniera accurata l'andamento dei dati di monitoraggio nel tempo, grazie alle analisi di best fitting, si effettua uno zoom indicato con il riquadro nero per tutte le analisi effettuate.



Figura 2.1.3 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 34 - 5 - 3

In *Figura 2.1.3* si riportano gli andamenti ottenuti dalle analisi di best – fitting (esponenziale e potenza) per l'estensimetro *Mph-L+34-5-3*, riferite al mese di febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021. Da tali andamenti, si evince che nei mesi di febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021 i dati di monitoraggio seguono la legge esponenziale e, dunque, l'estensimetro in esame risulta stabile nel tempo con un valore atteso di spostamento costante di 22,7 mm, con riferimento all'ultima analisi di giugno 2021.

In *Figura 2.1.4* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.1.5* le analisi di best-fitting dell'estensimetro *Mph-R0+24-3-4*.



Figura 2.1.4 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph-R0+24-3-4



Figura 2.1.5 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 24 - 3 - 4

In *Figura 2.1.5* si riportano gli andamenti ottenuti dalle analisi di best – fitting dell'estensimetro Mph-L0+34-5-3, relative al mese di febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021. Da tali andamenti, si evince che nei mesi di febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021 anche questi dati di monitoraggio seguono la legge esponenziale e, dunque, l'estensimetro in esame risulta stabile nel tempo con un valore atteso di spostamento costante di 49,3 mm, con riferimento all'ultima analisi di giugno 2021.

In *Figura 2.1.6* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.1.7* le analisi di best-fitting dell'estensimetro *Mph-R0+47-4-4*.



Figura 2.1.6 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph-R0+47-4-4



Figura 2.1.7 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 47 - 4 - 4

In *Figura 2.1.7* si riportano gli andamenti ricavati dalle analisi di best – fitting (esponenziale e potenza) dell'estensimetro *Mph-L0+47-4-4*, per il mese di febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021. Da tali andamenti, si deduce che nel mese di febbraio 2021 seguono un andamento di potenza; invece, nel mese di marzo, aprile, maggio e giugno 2021 seguono la legge esponenziale e, dunque, l'estensimetro in esame risulta stabile nel tempo con un valore atteso di spostamento costante di 45,7 mm, con riferimento all'ultima analisi di giugno 2021.

In *Figura 2.1.8* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.1.9* le analisi di best-fitting dell'estensimetro *Mph-R0+56-2-3*.



Figura 2.1.8 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph-R0+56-2-3



Figura 2.1.9 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - R0 + 56 - 2 - 3

Dagli andamenti delle curve di best – fitting, illustrati in *Figura 2.1.9* per l'estensimetro *Mph-R0+56-2-3* e riferiti al mese di febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021. si nota che nei primi quattro mesi seguono un andamento di potenza; invece, solo nel mese di giugno 2021 seguono la legge esponenziale e, dunque, l'estensimetro in esame risulta stabile nel tempo con un valore atteso di spostamento costante di 23,9 mm, con riferimento all'ultima analisi di giugno 2021.

Alla luce dei risultati sopra esposti, in *Tabella 2.1.1* si riportano i valori degli spostamenti attuali, riferiti al mese di giugno 2021, ed i valori attesi nel tempo degli spostamenti ottenuti con le analisi di best-fitting considerando la legge esponenziale. Per gli estensimetri che in un determinato mese non sono stabili, quindi, potenzialmente seguono una legge di potenza, si riporta in corsivo il valore ottenuto con legge esponenziale, riferita al mese di analisi studiato, al fine di avere una stima del valore atteso (tipo l'estensimetro Mph-R0+47-4-4 e MphR0+56-2-3). Inoltre, si indica per ogni estensimetro l'andamento (*Trend*) dei dati di monitoraggio nel tempo con i seguenti simboli:

- Il simbolo " ↑ " indica che l'andamento dei dati di monitoraggio incrementa nel tempo;
- Il simbolo " \downarrow " indica che l'andamento dei dati di monitoraggio decrementa nel tempo;
- Il simbolo " ↔ " indica che l'andamento dei dati di monitoraggio oscilla nel tempo, cioè che nel tempo non segue un andamento lineare ma aumenta e diminuisce.

Tabella 2.1.1 Riepilogo	o dei dati degli spostament	i attuali (Giugno) ed attesi r	per ogni fitting effettuat	o (Upstream)
1400114 2.1.1 140011050	act aatt acsti spostament	i annan (Ongho) ea anesi p	for ogni juning ejjennan	(opsu cam)

Estensimetri	Valore attuale [mm] (Giugno)	Valore atteso [mm]						
		01/02/2021	25/03/2021	21/04/2021	25/05/2021	18/06/2021		
Mph-L0+34-5-3	22,2	22,8	21,9	22,4	22,5	22,7	1	
Mph-R0+24-3-4	48,6	50,1	47,4	49	49,2	49,3	1	
Mph-R0+47-4-4	44,7	45,6	46,2	45,9	45,7	45,7	\downarrow	
Mph-R0+56-2-3	23,5	22,8	23,3	23,6	23,8	23,9	1	

In *Allegato 1* si riportano i dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle analisi di best – fitting degli estensimetri della parete upstream della PH.

2.2 Estensimetri (DS – PH)

In Figura 2.2.1 si riportano i sei estensimetri (Mph-L0+16-6-4, Mph-L0+16-9-4, Mph-R0+07-6-4, Mph-R0+07-6-4, Mph-R0+47-5-4 e Mph-R0+47-8-4) selezionati sulla sezione Downstream della Powerhouse, indicati con il riquadro in rosso.



Figura 2.2.1 Parete laterale della Powerhouse (Downstream) con gli estensimetri

Di seguito, si riportano le analisi di best – fitting effettuate con le due leggi esponenziale (*eq. 1*) e di potenza (*eq. 2*) mediante il software *OriginLab*, prestando particolare attenzione alla stabilità dei dati di monitoraggio nel tempo.

In *Figura 2.2.2* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.2.3* le analisi di best-fitting dell'estensimetro *Mph-L0+16-6-4*.



Figura 2.2.2 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph - L0 + 16 - 6 - 4



Figura 2.2.3 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 16 - 6 - 4

In *Figura 2.2.3* si riportano gli andamenti delle curve di analisi di best – fitting (esponenziale e potenza) per l'estensimetro *Mph-L0+16-6-4.*, riferite al mese di febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021. Dagli andamenti, si nota che nel mese di febbraio, marzo, aprile e maggio, giugno 2021 seguono un andamento esponenziale e, dunque, l'estensimetro risulta stabile nel tempo con un valore atteso di spostamento costante di 24,7 mm, con riferimento all'ultima analisi di giugno 2021.

In *Figura 2.2.4* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.2.5* le analisi di best-fitting dell'estensimetro *Mph-L0+16-9-4*.



Figura 2.2.4 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph - L0 + 16 - 9 - 4



Figura 2.2.5 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 16 - 9 - 4

Dall'andamento ricavato dalle analisi di best – fitting (*Figura 2.2.5*), riferite al mese di febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021, si evince che inizialmente, nel mese di febbraio 2021, l'estensimetro *Mph-L0+16-9-4* segue la legge esponenziale, mentre nei mesi di marzo, aprile, maggio e giugno 2021 segue la legge di potenza. Dunque, tale estensimetro risulterebbe ad oggi instabile. Tuttavia, al fine di avere una stima del valore dello spostamento nel tempo si fa riferimento sempre all'andamento esponenziale con un valore atteso di spostamento costante di 24,7 mm, con riferimento al mese di giugno.

In *Figura 2.2.6* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.2.7* le analisi di best-fitting dell'estensimetro *Mph-R0+07-6-4*.



Figura 2.2.6 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph - R0 + 7 - 6 - 4



Figura 2.2.7 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - R0 + 7 - 6 - 4

I risultati delle analisi di best – fitting, *illustrati in Figura 2.2.7*, mostrano che l'estensimetro *Mph-R0+7-6-4* nei primi tre mesi, febbraio, marzo ed aprile 2021, segue un andamento esponenziale e solo negli ultimi due mesi maggio e giugno 2021 segue la legge di potenza e, dunque, risulterebbe non stabile nel tempo. Al fine di avere una stima del valore dello spostamento nel tempo nel tempo si fa riferimento sempre all'andamento esponenziale con un valore atteso di spostamento costante di 23,4 mm, con riferimento al mese di giugno.

In *Figura 2.2.8* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.2.9* le analisi di best-fitting dell'estensimetro *Mph-R0+07-8-4*.



Figura 2.2.8 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph - R0 + 7 - 8 - 4



Figura 2.2.9 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - R0 + 7 - 8 - 4

Le curve di best - fitting, illustrate in *Figura 2.2.9* e riferite all'estensimetro *Mph-R0+7-8-4*, mostrano che nei primi due mesi, febbraio e marzo 2021, segue un andamento esponenziale e solo negli ultimi tre mesi aprile, maggio e giugno 2021 segue la legge di potenza e, dunque, risulterebbe non stabile nel tempo. Per avere una stima del valore dello spostamento nel tempo si fa riferimento sempre all'andamento esponenziale con un valore atteso di spostamento costante di 8,5 mm, con riferimento al mese di giugno.

Studio di una caverna sotterranea appartenente ad un impianto idroelettrico: analisi dei dati di monitoraggio e modellazione numerica

In *Figura 2.2.10* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.2.11* le analisi di best-fitting dell'estensimetro *Mph-R0+47-5-4*.



Figura 2.2.10 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph - R0 + 47 - 5 - 4



Figura 2.2.11 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - R0 + 47 - 5 - 4

Dall'andamento ottenuto dalle analisi di best – fitting, illustrati in *Figura 2.2.11*, si deduce che inizialmente, nel mese di febbraio 2021, l'estensimetro *Mph-R0+47-5-4* segue la legge esponenziale, nei mesi di marzo e aprile 2021, invece, segue la legge di potenza ed, infine, negli ultimi due mesi di maggio e giugno 2021 segue nuovamente la legge esponenziale. Dunque, tale estensimetro risulterebbe ad oggi stabile con un valore atteso di spostamento costante nel tempo di 21,2 mm, con riferimento al mese di giugno 2021.

In *Figura 2.2.12* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.2.13* le analisi di best-fitting dell'estensimetro *Mph-R0+47-8-4*.



Figura 2.2.12 Dati di monitoraggio dell'estensimetro Mph - R0 + 47 - 8 - 4



Figura 2.2.13 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 47 - 8 - 4

Le curve di best – fitting, riportate in *Figura 2.2.13*, mostrano che inizialmente, nel mese di febbraio 2021, l'estensimetro Mph-L0+47-8-4 segue la legge esponenziale e, invece, nei mesi di marzo, aprile, maggio e giugno 2021 segue la legge di potenza. Dunque, per avere una stima del valore dello spostamento nel tempo si fa riferimento sempre all'andamento esponenziale con un valore atteso di spostamento costante di 24,6 mm, con riferimento al mese di giugno 2021.

Alla luce dei risultati sopra descritti, in *Tabella 2.2.1* si riportano i valori degli spostamenti attuali, riferiti al mese di giugno 2021, ed attesi nel tempo ottenuti con le analisi di best-fitting considerando la legge esponenziale. Per gli estensimetri che non sono stabili (seguono una legge di potenza) si riporta il valore ottenuto con legge esponenziale al fine di avere una stima del valore atteso e sono riportati in corsivo. Inoltre, si indica per ogni estensimetro l'andamento (Trend) dei dati di monitoraggio nel tempo con la stessa simbologia usata precedentemente.

Estensimetri	Valore attuale [mm] (Giumo)	Valore atteso [mm]						
	(Olugilo)	01/02/2021	25/03/2021	21/04/2021	25/05/2021	18/06/2021		
Mph-L0+16-6-4	23,3	33,8	23,5	23,7	24,5	24,7	1	
Mph-L0+16-9-4	17,7	15,7	15,1	15,8	17,3	18,4	1	
Mph-R0+07-6-4	23,1	22,9	22,7	22,8	23,2	23,4	\uparrow	
Mph-R0+07-8-4	8,1	7,4	7,3	7,3	7,9	8,5	\uparrow	
Mph-R0+47-5-4	21	21,2	21	21,2	21,2	21,2	\downarrow	
Mph-R0+47-8-4	24,1	23	23,4	23,9	24,4	24,6	\uparrow	

Tabella 2.2.1 Riepilogo dei dati degli spostamenti attuali (Giugno) ed attesi per ogni fitting effettuato (Downstream)

In *Allegato 2* si riportano i dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle analisi di best – fitting degli estensimetri della parete downstream della PH.

2.3 Tiranti (UP – PH)

In Figura 2.3.1 si evidenziano con un riquadro in rosso i sei tiranti (*DPph-21-R52U*, *DPph-35-R0U*, *DPph-50-R22U*, *DPph-73-L27U*, *DPph-505-R56S* e *DPph-512-L23U*) selezionati sulla sezione *Upstream* della *Powerhouse*.



Figura 2.3.1 Parete laterale della Powerhouse (Upstream) con i tiranti

Di seguito, si riportano le analisi di best – fitting effettuate con le due leggi esponenziale (*eq. 1*) e di potenza (*eq. 2*) mediante il software *OriginLab*, prestando particolare attenzione alla stabilità dei dati di monitoraggio nel tempo.

In *Figura 2.3.2* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.3.3* le analisi di best-fitting del tirante *DPph-21-R52U*.



Figura 2.3.2 Dati di monitoraggio del tirante DPph-21-R52U



Figura 2.3.3 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph - 21 - R52U

In *Figura 2.3.3* si riportano gli andamenti delle curve di best – fitting (esponenziale e potenza) per il tirante *DPph-21-R52U*, riferite al mese di febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021. Si osserva che il tirante segue la legge esponenziale in tutti i mesi di osservazione, febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021 e, dunque, mostra misure stabili nel tempo con un valore atteso di carico di 819 kN, con riferimento al mese di giugno 2021.

In *Figura 2.3.4* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.3.5* le analisi di best-fitting del tirante *DPph-35-R0U*.



Figura 2.3.4 Dati di monitoraggio del tirante DPph-35-R0U



Figura 2.3.5 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 35 – R0U

Dall'andamento ottenuto dalle analisi di best – fitting, mostrate in *Figura 2.3.5*, si nota che il tirante *DPph-35-R0U* segue la legge esponenziale nei primi due mesi di febbraio e marzo 2021; successivamente, dal momento che la forza sollecitante supera il limite di progetto, viene scaricato in situ in modo tale da essere ricaricato. Ad oggi, mese di giugno 2021, sembra che il tirante non risulti molto stabile, con un valore atteso di carico di 920 kN. Inoltre, sempre in *Figura 2.3.4*, si può osservare che, dall'analisi di best fitting di giugno 2021, il tirante sembra di nuovo sopra il limite di progetto.

In *Figura 2.3.6* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.3.7* le analisi di best-fitting del tirante *DPph-50-R22U*.



Figura 2.3.6 Dati di monitoraggio del tirante DPph-50-R22U



Figura 2.3.7 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph - 50 - R22U

Dalle curve di best – fitting, illustrate in Figura 2.3.7, si evince che il tirante *DPph-50-R22U* segue la legge esponenziale nei primi due mesi di febbraio e marzo 2021; successivamente, dal momento che supera il limite di progetto, viene scaricato in situ in modo tale da essere ricaricato. Ad oggi, mese di giugno 2021, sembra che il tirante sia stabile dal momento che segue un andamento esponenziale con un valore atteso di carico di 920 kN.

In *Figura 2.3.8* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.3.9* le analisi di best-fitting del tirante *DPph-73-L27U*.



Figura 2.3.8 Dati di monitoraggio del tirante DPph-73-L27U



Figura 2.3.9 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 73 – L27U

Dalle analisi di best – fitting, illustrate in *Figura 2.3.9*, si nota che il tirante *DPph-73-L27U* segue inizialmente, nel mese di febbraio 2021, la legge esponenziale; successivamente, nei mesi di marzo ed aprile 2021, segue la legge di potenza e, negli ultimi mesi di maggio e giugno 2021 segue nuovamente la legge esponenziale e, dunque, risulta stabile nel tempo con un valore atteso di sollecitazione nel tempo di 381 kN, con riferimento al mese di giugno 2021.

In *Figura 2.3.10* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.3.11* le analisi di best-fitting del tirante *DPph-505-R56S*.



Figura 2.3.10 Dati di monitoraggio del tirante DPph-505-R56S



Figura 2.3.11 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 505 – R56S

Dall'andamento delle curve di best – fitting, mostrati in *Figura 2.3.11*, si evince che il tirante DPph - 505 - R56S segue la legge di potenza nei mesi di febbraio, marzo, aprile e maggio 2021. Solo nell'ultimo mese di giugno sembra seguire una legge esponenziale e, dunque, la sollecitazione risulta stabile nel tempo con un valore costante di 443 kN, con riferimento al mese di giugno 2021.

In *Figura 2.3.12* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.3.13* le analisi di best-fitting del tirante *DPph-512-L23U*.



Figura 2.3.12 Dati di monitoraggio del tirante DPph-512-L23U



Studio di una caverna sotterranea appartenente ad un impianto idroelettrico: analisi dei dati di monitoraggio e modellazione numerica



Figura 2.3.13 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph - 512 - L23U

Dall'andamento ottenuto dalle analisi di best – fitting, illustrate in *Figura 2.3.13*, si evince che il tirante *DPph-21-R52U* segue la legge esponenziale in tutti i mesi di osservazione mostrando misure di sollecitazioni stabili nel tempo con un valore atteso di 756 kN, con riferimento al mese di giugno 2021.

Alla luce dei risultati ottenuti, in *Tabella 2.3.1* si riportano i valori attuali, riferiti al mese di giugno 2021, ed attesi nel tempo dei tiranti ottenuti con le analisi di best-fitting considerando la legge esponenziale. Per i tiranti, come per gli estensimetri, che non sono stabili (seguono una legge di potenza) si riporta il valore ottenuto con legge esponenziale al fine di avere una stima del valore atteso e sono riportati in corsivo. Inoltre, si indica per ogni tirante l'andamento (Trend) dei dati di monitoraggio nel tempo con la simbologia usata precedentemente.

Infine, in rosso si indicano i tiranti che sono stati sollecitati con una forza superiore al limite di progetto.

Tiranti	Workig Limit [kN]	Valore attuale [kN]		Trend				
		(Giugno)	01/02/2021	25/03/2021	21/04/2021	25/05/2021	18/06/2021	
DPph-21-R52U	900	816	824	818	817	818	819	\leftrightarrow
DPph-35-R0U	700	580	795	743	-	-	920	\uparrow
DPph-50-R22U	800	676	919	866	-	-	700	\downarrow
DPph-73-L27U	800	386	366	369	375	378	381	\uparrow
DPph-505-R56S	800	441	428	438	441	442	443	\rightarrow
DPph-512-L23U	800	754	804	764	779	757	756	\downarrow

Tabella 2.3.1 Riepilogo dei dati di sollecitazione (Giugno) ed attesi per ogni fitting effettuato (Upstream)

In *Allegato 3* si riportano i dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle analisi di best – fitting dei tiranti della parete upstream della PH.

2.4 Tiranti (DS – PH)

In *Figura 2.4.1* si riportano i due tiranti (*DPph-508-R47D* e *DPph-722-L13D*) selezionati sulla sezione *Downstream* della *Powerhouse*, indicati con il riquadro in rosso.



Figura 2.4.1 Parete laterale della Powerhouse (Downstream) con i tiranti

Di seguito, si riportano le analisi di best – fitting effettuate con le due leggi esponenziale (eq. 1) e di potenza (eq. 2) nel software *OriginLab*, prestando particolare attenzione alla stabilità dei dati di monitoraggio nel tempo.

In *Figura 2.4.2* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.4.3* le analisi di best-fitting del tirante *DPph-508-R47D*.



Figura 2.4.2 Dati di monitoraggio del tirante DPph-508-R47D



Figura 2.4.3 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 508 – R47D

Le curve di best – fitting, illustrate in *Figura 2.4.3*, mostrano che il tirante *DPph-508-R47D* segue la legge di potenza in tutti i mesi di osservazione, febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021. Dunque, per avere una stima della sollecitazione del tirante nel tempo si fa riferimento all'andamento esponenziale con un valore atteso di 319 kN, con riferimento al mese di giugno 2021.

In *Figura 2.4.4* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.4.5* le analisi di best-fitting del tirante *DPph-722-L13D*.



Figura 2.4.4 Dati di monitoraggio del tirante DPph-722-L13D



Figura 2.4.5 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 722 – L13D

La Figura 2.4.5 mostra che anche l'estensimetro *DPph-722-L13D* segue la legge di potenza in tutti i mesi di osservazione, nei mesi di febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021. Tuttavia, al fine di avere una stima della sollecitazione del tirante nel tempo si fa riferimento all'andamento esponenziale con un valore atteso di 258 kN, con riferimento al mese di giugno 2021.

Alla luce dei risultati sopra descritti, in *Tabella 2.4.1* si riportano i valori attuali, riferiti al mese di giugno 2021, ed attesi nel tempo dei tiranti ottenuti con le analisi di best-fitting considerando la legge esponenziale. Per i tiranti, come per gli estensimetri, che non sono stabili si riporta il valore ottenuto con legge esponenziale al fine di avere una stima del valore atteso e sono riportati in corsivo. Inoltre, si indica per ogni tirante l'andamento (Trend) dei dati di monitoraggio nel tempo con la simbologia usata precedentemente.

Tiranti	Workig Limit [kN]	Valore attuale [kN] (Giugno)	Valore atteso [mm]					Trend
			01/02/2021	25/03/2021	21/04/2021	25/05/2021	18/06/2021	
DPph-508-R47D	800	319	307	314	316	317	319	\uparrow
DPph-722-L13D	500	237	226	231	239	257	258	\uparrow

Tabella 2.4.1 Riepilogo dei dati di sollecitazione (Giugno) ed attesi per ogni fitting effettuato (Downstream)

In *Allegato 4* si mostrano i dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle analisi di best – fitting dei tiranti della parete downstream della PH.

2.5 Tiranti (NS – PH)

In *Figura 2.5.1* si riportano i tre tiranti (*DPph-125-R56S*, *DPph-137-L34N* e *DPph-210-L34N*) selezionati sulla sezione *North - Sud* della *Powerhouse*, indicati con il riquadro in rosso, riferiti al mese di giugno 2021.



Figura 2.5.1 Parete Nord e Sud della Powerhouse con i tiranti

Di seguito, si riportano le analisi di best – fitting effettuate con le due leggi esponenziale (eq. 1) e di potenza (eq. 2) nel software *OriginLab*, prestando particolare attenzione alla stabilità dei dati di monitoraggio nel tempo.

In *Figura 2.5.2* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.5.3* le analisi di best-fitting del tirante *DPph-125-R56S*.



Figura 2.5.2 Dati di monitoraggio del tirante DPph-125-R56S





Figura 2.5.3 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 125 – R56S

In *Figura 2.5.3* si riportano gli andamenti ottenuti dalle analisi di best – fitting (esponenziale e potenza) per il tirante *DPph-125-R56S*, riferite al mese di febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021. Dalle analisi si evince che il tirante segue la legge esponenziale in tutti i mesi di osservazione, mostrando misure di sollecitazioni stabili nel tempo con un valore atteso di 585 kN, con riferimento al mese di giugno 2021.

In *Figura 2.5.4* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.5.* le analisi di best-fitting del tirante *DPph-137-L34N*.



Figura 2.5.4 Dati di monitoraggio del tirante DPph-137-L34N


Figura 2.5.5 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 137 – L34N

Dall'andamento delle curve di best – fitting, illustrate in *Figura 2.5.5*, si evince che anche il tirante *DPph-137-L34N* segue la legge esponenziale in tutti i mesi di osservazione mostrando, dunque, misure di sollecitazioni stabili nel tempo con un valore atteso di 824 kN, con riferimento al mese di giugno 2021.

In *Figura 2.5.6* si riportano gli andamenti dei dati di monitoraggio dal mese di ottobre 2020 al mese di giugno 2021 ed in *Figura 2.5.7* le analisi di best-fitting del tirante *DPph-210-L34N*.



Figura 2.5.6 Dati di monitoraggio del tirante DPph-210-L34N



Figura 2.5.7 Forza attesa in funzione del tempo del tirante DPph – 210 – L34N

Anche il tirante *DPph-210-L34N*, come mostrato in *Figura 2.5.7*, segue la legge esponenziale in tutti i mesi di osservazione mostrando misure di sollecitazioni stabili nel tempo con un valore atteso di 758 kN, con riferimento al mese di giugno 2021.

Alla luce dei risultati, in *Tabella 2.5.1* si riportano i valori attuali, riferiti al mese di giugno 2021, ed attesi nel tempo dei tiranti ottenuti con le analisi di best-fitting considerando la legge esponenziale. Per i tiranti, che non sono stabili e, quindi, potenzialmente seguono una legge di potenza, sono indicati anche con il valore ottenuto con legge esponenziale al fine di avere una stima del valore atteso e sono riportati in corsivo. Inoltre, si indica per ogni tirante l'andamento (Trend) dei dati di monitoraggio nel tempo con la simbologia usata precedentemente.

Infine, in rosso si indicano i tiranti che sono stati sollecitati con una forza superiore al limite di progetto.

Tiranti	Workig Limit [kN]	Valore attuale [kN]	Valore atteso [mm]					Trend
		(Giugiio)	01/02/2021	25/03/2021	21/04/2021	25/05/2021	18/06/2021	
DPph-125-R56S	800	851	869	864	860	858	858	\downarrow
DPph-137-L34N	900	823	829	817	819	822	824	\leftrightarrow
DPph-210-L34N	800	778	796	778	783	784	785	\leftrightarrow

Tabella 2.5.1 Riepilogo dei dati di sollecitazione (Giugno) ed attesi per ogni fitting effettuato (Nord - Sud)

In *Allegato 5* si mostrano i dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle analisi di best – fitting dei tiranti delle pareti nord e sud della PH.

2.6 Osservazioni generali sulle analisi di best – fitting

In *Figura 2.6.1* si illustra la rappresentazione 3D dell'impianto idroelettrico, indicando le quattro sezioni della PH. Come rilevato precedentemente, quest'ultima risulta essere stabile in alcune aree delle pareti longitudinali e non stabile in altre parti *Upstream* e *Downstream* e nelle due facce *Nord* e *Sud*.



Figura 2.6.1 Rappresentazione 3D dell'impianto idorelettrico

Orientativamente si riportano degli intervalli di tempo di scavo di alcune caverne dell'impianto idroelettrico:

- Powerhouse (da dicembre 2018 a gennaio 2021);
- Caverne di collegamento (quasi tutto il 2019, con ulteriori interventi nel 2021);
- Transformer Hall (da febbraio 2019 a ottobre 2019);

Di seguito vengono illustrati complessivamente i risultati ottenuti delle varie analisi di best – fitting al fine di comprendere una potenziale stabilità o instabilità di ogni parete della Powerhouse (Upstream, Downstream, Nord e Sud) grazie alla presenza degli estensimetri e tiranti, tenendo in considerazione anche le date degli scavi e di eventuali interventi successivi prima riportati, al fine di comprendere accuratamente e complessivamente le analisi effettuate:

- Parete laterale della Powerhouse (Upstream e Downstream) estensimetri;
- Parete laterale della Powerhouse (Upstream e Downstream) tiranti;
- Parete Nord e Sud della Powerhouse (Nord e Sud) tiranti.

2.6.1 Parete laterale della Powerhouse (Upstream e Downstream) estensimetri

Si può osservare che la parete laterale della Powerhouse (*Upstream*) estensimetri, risulta complessivamente stabile. In particolare, gli estensimetri Mph-L0+34-5-3, Mph-R0+24-3-4 e Mph-R0+47-4-4 (*Figura 2.6.1.1*) sembrano seguire la legge esponenziale in tutti i mesi di osservazione (febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2021). Solo l'estensimetro Mph-R0+56-2-3 segue la legge di potenza nei mesi di febbraio, marzo, aprile e maggio 2021 e, nell'ultimo mese di giugno, la legge esponenziale. Dunque, alla luce dei risultati ottenuti, si può notare che tali strumenti di misura sulla parete *Upstream* sembrano stabili.



Figura 2.6.1.1 Parete laterale della Powerhouse (Upstream) con gli estensimetri

Analizzando la parete laterale della *Powerhouse (Downstream) estensimetri,* riportata in *Figura 2.6.1.2.* si osserva che gli estensimetri *Mph-L0+16-6-4, Mph-L0+16-9-4, Mph-R0+07-6-4, Mph-R0+07-8-4* e *Mph-R0+47-8-4* seguono complessivamente una legge di potenza e dunque sembrerebbero instabili. Solo l'estensimetro *Mph-R0+47-5-4* segue negli ultimi due mesi (maggio e giugno 2021) una legge esponenziale.



Figura 2.6.1.2 Parete laterale della Powerhouse (Downstream) con gli estensimetri

Questi risultati potrebbero essere legati a due importanti aspetti:

- 1) gli estensimetri Mph-L0+16-6-4, Mph-L0+16-9-4, Mph-R0+07-6-4, Mph-R0+07-8-4 e Mph-R0+47-8-4 sono posizionati nella parete laterale della Powerhouse vicino alle caverne di collegamento (Busbar Tunnels, Old Main Access Tunnel e Nex Main Access Tunnel) dove, nei mesi di aprile e maggio 2021, sono stati effettuati ulteriori scavi alla base delle caverne di collegamento (Busbar Tunnel);
- 2) l'estensimetro *Mph-R0+47-5-4* risulta posizionato lontano, rispetto agli estensimetri prima citati, dalle caverne di collegamento e dunque non risulterebbe influenzato da questi ulteriori interventi.

Dunque, complessivamente, si può notare che la *Powerhouse* ad oggi, nel mese di giugno 2021, risulta stabile lungo la parete laterale upstream e, invece, instabile lungo la parete downstream. Questo risultato può essere collegato agli ulteriori scavi effettuati alla base delle caverne di collegamento (*Busbar Tunnel*) e, vista la loro disposizione, influenzano notevolmente la parete downstream rispetto alla parete upstream.

2.6.2. Parete laterale della Powerhouse (Upstream e Downstream) tiranti

Analizzando lungo la parete laterale della *Powerhouse (Upstream) tiranti*, illustrata in *Figura 2.6.2.1*, si può notare ed affermare che in questa sezione i tiranti sono complessivamente stabili. In particolare, i tiranti *DPph-21-R52U e DPph-512-L23U* seguono sempre una legge esponenziale; i tiranti *DPph-35-R0U* e *DPph-50-R22U*, invece, pur seguendo la legge esponenziale nei primi due mesi, sono stati scaricati ad inizio aprile dal momento che i loro valori attuali erano superiori al limite di progetto della forza, rispettivamente di 700 kN e 800 kN. Ad oggi, mese di giugno, il tirante *DPph-35-R0U* sembra seguire una legge esponenziale ma con un valore atteso di nuovo superiore al valore di progetto ed, invece, il tiranti *DPph-50-R22U* segue una legge esponenziale con un valore atteso sotto al limite di progetto. Infine, i tiranti *DPph-73-L27U* e *DPph-505-R56S* pur seguendo da febbraio a maggio una legge di potenza, nel mese di giugno seguono una legge esponenziale. Complessivamente, si può affermare, come detto inizialmente, che i tiranti sono complessivamente stabili. Un'importante osservazione è che tale risultato è coerente con il risultato degli estensimetri localizzati lungo la stessa parete di studio.



Figura 2.6.2.1 Parete laterale della Powerhouse (Upstream) con i tiranti

Adesso, come fatto per gli estensimetri, si analizzano complessivamente i tiranti lungo la parete laterale della *Powerhouse (Downstream) tiranti,* riportata in *Figura 2.6.2.2.* In particolare, questi due tiranti *DPph-508-R47D* e *DPph-722-L13D* posizionati in questa sezione, seguono complessivamente, per tutti i mesi di osservazione, una legge di potenza. Questo risultato era ed è prevedibile dal momento che, alla luce di quanto detto per gli estensimetri posizionati nella stessa medesima *Downstream*, seguono anche loro complessivamente una legge di potenza. Dunque, rispetto a quanto succede nella parte upstream, dove globalmente estensimetri e tiranti seguono una legge esponenziale, nella parte downstream seguono una legge di potenza. Questo risultato che i possibili ulteriori interventi nelle varie parti di collegamento tra la *Powerhouse* e *Transformer Hall* influenzano tali strumenti.



Figura 2.6.2.2 Parete laterale della Powerhouse (Downstream) con i tiranti

2.6.3 Parete Nord e Sud della Powerhouse tiranti

Con riferimento alla parete laterale della *Powerhouse (Sud e Nord) tiranti*, illustrata in *Figura 2.6.3.1*, si può affermare che le due sezioni risultano complessivamente stabili. In particolare, i tiranti *DPph-125-R56S*, *DPph-137-L34N* e *DPph-210-L34N* seguono durante i mesi di osservazione, sempre una legge esponenziale. Il tirante *DPph-125-R56S*, pur essendo attualmente sollecitato con una forza superiore a quello di progetto, non è ancora stato scaricato. Dunque, alla luce dei risultati ottenuti si può affermare che le due facce, *Nord* e *Sud*, risultano essere complessivamente stabili.



Figura 2.6.3.1 Parete Nord e Sud della Powerhouse con i tiranti

3. Applicazione del modello di Sulem et al. (1987)

3.1 Cenni teorici dell'approccio di Sulem

E' importante saper interpretare in maniera corretta i dati di monitoraggio al fine di distinguere fra gli spostamenti totali quelli legati all'avanzamento dello scavo e da quelli dipendenti dal tempo. Un modo utile per separare questi due effetti è attraverso il modello di *Sulem et al. (1987)*, che consente di stimare la convergenza di un tunnel con sezione circolare, con roccia intorno al tunnel omogenea ed isotropa, e scavo profondo considerando che la distribuzione delle tensioni è omogenea. Dunque, con questo modello è possibile tenere in considerazione, tramite il calcolo della convergenza, sia l'effetto di allontanamento del fronte (C_1 (x)), sia il comportamento tempo-dipendente del mezzo sottoposto allo scavo (C_2 (t)).

Indicando con C(x, t) la convergenza di una generica galleria, il modello proposto è il seguente:

$$C(x,t) = C_{1}(x) + C_{2}(t) = C_{inf,x} \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x+X}\right)^{2}\right] \cdot \left\{1 + m \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{t+T}\right)^{n}\right]\right\} \quad (eq.5)$$

dove x è la distanza tra il fronte e la sezione monitorata, t è il tempo trascorso dal passaggio del fronte in corrispondenza della sezione monitorata, $C_{inf,x}$ rappresenta la convergenza massima nella condizione ideale di scavo a distanza infinita, il parametro X è una lunghezza correlata alla distanza di influenza del fronte di scavo, assunta pari all'84% del raggio plastico R_{pl} nell'ipotesi di comportamento elastoplastico dell'ammasso (*Panet e Guenot, 1982*) e T è un parametro caratteristico delle proprietà dipendenti dal tempo del terreno; m, T ed n descrivono l'influenza del tempo, permettendo di riprodurre le deformazioni del cavo a fronte fermo.

I parametri $C_{inf,x}$, *m*, *T* ed *n* sono le incognite del problema. *Sulem* suggerisce di considerare *n* uguale a 0,3 e di ottenere una stima di tali parametri tramite una regressione lineare con i dati di misura di convergenza.

In particolare, per velocità di avanzamento relativamente alte, ovvero per tempi di avanzamento molto minori del tempo caratteristico del processo reologico, l'effetto del tempo sulla deformazione del profilo di scavo è trascurabile in prossimità del fronte. In questo caso la variazione della misura di convergenza in prossimità del fronte può essere interpretata con l'equazione:

$$C(x,t) = C_{inf,x} \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x+X}\right)^2\right] \qquad (eq.6)$$

mentre nel caso di fronte sufficientemente lontano si può usare con la seguente equazione:

$$C(x,t) = C_{inf,x} \cdot \left\{ 1 + m \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{t+T}\right)^n \right] \right\}$$
 (eq.7)

La relazione di *Sulem et al.* è utile a comprendere la differenza fra gli spostamenti meccanici e reologici e, dunque, anche una semplice rappresentazione analitica dell'andamento asintotico, nello spazio e nel tempo, del profilo longitudinale delle convergenze/spostamenti osservati.

3.1.1 Metodo per la stima dei parametri dell'approccio di Sulem

In questo capitolo, si illustra un metodo di calcolo per determinare i parametri incogniti dell'approccio proposto da *Sulem et al. (1987),* così da applicare l'equazione per ottenere la convergenza C(x,t) ed infine, sapendo che la convergenza sia due volte lo spostamento radiale, quest'ultimo risulta essere ottenibile dividendo la convergenza per 2 (*eq. 8*):

$$C(x,t) = 2 \cdot u_r = u_r = \frac{C(x,t)}{2}$$
 (eq.8)

Si ipotizza un raggio equivalente circolare della *Powerhouse* al fine di applicare il metodo di *Sulem et al.* (1987). Così, ricavando gli spostamenti, è possibile confrontare i risultati ottenuti con le analisi di best – fitting.

Tale processo viene effettuato per due estensimetri Mph - L0 + 34 - 5 - 3 e Mph - L0 + 47 - 8 - 4 localizzati, rispettivamente, nella sezione *Upstream* e *Downstream* della *Powerhouse* che risultano rispettivamente, alla luce delle analisi di best – fitting ottenute, stabile ed instabile nel lungo periodo. Come illustrato precedentemente, al fine di ricavare la convergenza C(x,t) si considerano le convergenze misurate con il fronte sufficientemente lontano e si utilizza *l'equazione 5* ricavando i parametri incogniti $C_{inf,x}$, *m*, *T ed n* tramite l'utilizzo di un risolutore che, grazie ai dati di misura disponibili, restituisce tali valori.

Di seguito, si riportano i diversi passaggi effettuati per i due estensimetri:

- Si considerano i dati di monitoraggio scaricati sul software per gli estensimetri Mph L0 + 34 5 -3 e Mph-L0+47-8-4;
- Si calcola la convergenza con *l'equazione 8*;
- Sui dati di misura di convergenza ottenuti, si applica una funzione *Risolutore* presente su *Excel* al fine di ricavare i parametri incogniti $C_{inf,x}$, m, T che, utilizzati per calcolare la convergenza C(x,t) (eq. 5), interpolano in maniera attendibile i dati di misura con un coefficiente di determinazione *R-squared* (R^2), per entrambi gli estensimetri, pari a 0,98. Si sottolinea che il parametro n è imposto uguale a 0,30, come proposto dagli Autori;
- Infine, conoscendo la convergenza C(x,t) è possibile ricavare lo spostamento radiale tramite *l'equazione 8*;
- Tale processo viene effettuato sui dati di misura riferiti da marzo a giugno 2021 al fine di avere più dati a disposizione per calcolare gli spostamenti e, successivamente, vengono confrontati con le analisi di best- fitting.

In *Figura 3.1.1.1* e Figura *3.1.1.2* si riportano, rispettivamente, le analisi di best fitting riferiti all'estensimetro Mph - L0 + 34 - 5 - 3 e gli spostamenti u_r calcolati per ogni mese tramite i vari passaggi descritti precedentemente. In *Tabella 3.1.1.1* si riportano i parametri $C_{inf.x.}m$, *T ed n* ottenuti.



Figura 3.1.1 1 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - L0 + 34 - 5 - 3



Figura 3.1.1.2 Spostamento atteso calcolato tramite il metodo di Sulem dell'estensimetro Mph - L0 + 34 - 5 - 3

Mph-L0+34-5-3										
Marzo)	Aprile	;	Maggi	0	Giugno				
T [giorni]	84,31	T [giorni]	84,25	T [giorni]	84,31	T [giorni]	84,32			
C _{inf, x} [mm]	37,20	C _{inf, x} [mm]	37,35	C _{inf, x} [mm]	37,35	C _{inf, x} [mm]	37,35			
m [-]	0,53									
n [-]	0,30									

Tabella 3.1.1.1 Parametri incogniti del metodo di Sulem dell'estensimetro Mph - L0 + 34 - 5 - 3

Alla luce dei risultati ottenuti, si evince che i parametri $C_{inf,x}$, *m*, *T* ed *n* sono quasi simili per ogni mese; questo risultato potrebbe essere legato al fatto che tale estensimetro segue una legge esponenziale. Inoltre, è interessante confrontare gli spostamenti ottenuti con il modello di *Sulem et al.*, che considerano un comportamento tempo-dipendente del mezzo sottoposto allo scavo, con le analisi di best – fitting dal momento che quest'ultime sono ottenute tramite formulazioni matematiche considerando solo il tempo. In particolare, nelle *Figure 3.1.1.1* e *3.1.1.2* si evince che nel lungo periodo gli spostamenti ottenuti tramite analisi di best fitting, con le leggi esponenziale, sono comparabili con gli spostamenti ricavati dall'approccio di *Sulem et al.*, con quest'ultimi sovrapposti per ogni mese e leggermente crescenti rispetto a quelli ottenuti con le analisi. Tale risultato potrebbe essere legato al fatto che si tiene conto del comportamento tempo-dipendente del mezzo sottoposto allo scavo.

In *Figura 3.1.1.3* e Figura *3.1.1.4* si riportano, rispettivamente, le analisi di best fitting riferiti all'estensimetro Mph-L0+47-8-4 e gli spostamenti u_r calcolati per ogni mese tramite i vari passaggi descritti precedentemente. In *Tabella 3.1.1.2* si riportano i parametri $C_{inf,x}$, *m*, *T* ed *n* ottenuti.



Figura 3.1.1.3 Spostamento atteso in funzione del tempo dell'estensimetro Mph - R0 + 47 - 8 - 4



Figura 3.1.1.4 Spostamento atteso calcolato tramite il metodo di Sulem dell'estensimetro Mph - R0 + 47 - 8 - 4

Mph-R0+47-8-4										
Marzo Aprile Maggio Giugno										
T [giorni]	31,50	T [giorni]	41,70	T [giorni]	41,49	T [giorni]	68,63			
C _{inf, x} [mm]	40,80	C _{inf, x} [mm]	41,05	C _{inf, x} [mm]	41,05	C _{inf, x} [mm]	41,35			
m [-]	0,31	m [-]	0,35	m [-]	0,35	m [-]	0,42			
n [-]	0,30	n [-]	0,30	n [-]	0,30	n [-]	0,30			

Tabella 3.1.1.2 Parametri incogniti del metodo di Sulem dell'estensimetro Mph - R0 + 47 - 8 - 4

Per tale estensimetro, invece, si evince che i parametri $C_{inf,x,m}$, *T ed n* sono simili solo per aprile e maggio 2021 dal momento che tale estensimetro risulta essere inizialmente instabile e, sembra, solo nei mesi di aprile e maggio 2021 stabile. Tuttavia, dal momento che con gli ultimi dati di giugno 2021 si ha di nuovo una in stabilizzazione, i dati dei parametri riferiti a quest'ultimo mese di analisi crescono. Inoltre, nelle *Figure 3.1.1.3* e *3.1.1.4* si evince che nel lungo periodo gli spostamenti ottenuti tramite l'approccio di *Sulem et al.* aumentano per ogni mese di osservazione e sono sovrapposti solo per il mese di aprile e maggio 2021. Dunque, anche gli spostamenti di giugno 2021 ottenuti tramite il modello di Sulem *et al.* sono leggermente maggiori a quelli ottenuti tramite analisi di best-fitting con legge esponenziale.

Pertanto, considerando due estensimetri (Mph - L0 + 34 - 5 - 3 e Mph - R0 + 47 - 8 - 4) con comportamenti diversi nel tempo, dove il primo segue una legge esponenziale mentre il secondo una legge di potenza, si può notare che l'approccio proposto da *Sulem et al.* può essere applicato calcolando degli spostamenti che, come detto precedentemente, tengono anche conto delle informazioni legate al comportamento tempo-dipendente del mezzo sottoposto allo scavo. Quindi, oltre alla sola stabilità o instabilità legata alle analisi di best – fitting dal punto di vista matematico, si può studiare la stabilità attraverso gli spostamenti calcolati con il modello di *Sulem et al.*

Alla luce dei risultati ottenuti, grazie alle analisi di best – fitting ed all'approccio di *Sulem et al.*, siamo in grado di avere, dunque, maggiori informazioni sui sistemi di monitoraggio. In particolare, si deduce che in entrambi gli estensimetri i risultati ottenuti con la formulazione di *Sulem* sembrano seguire la legge esponenziale con andamenti leggermente crescenti. Nel dettaglio, per l'estensimetro Mph - L0 + 34 - 5 - 3, che dalle analisi di best-fitting sembra stabile, viene confermata la stabilità anche con il metodo di *Sulem et al.*, con valori di spostamenti attesi leggermente maggiori (*Figura 3.1.1.2*); questo potrebbe essere correlato al fatto che, come già detto, *Sulem* considera il comportamento tempo-dipendente del mezzo sottoposto allo scavo. Invece, per l'estensimetro *Mph - R0 + 47 - 8 - 4*, che dalle analisi di best-fitting sembra instabile, anche con il metodo di *Sulem et al.* si può dire che viene confermata tale instabilità con spostamenti attesi che, invece, aumentano per ogni mese di osservazione (*Figura 3.1.1.4*).

E' importante, quindi, notare che vi è un'affinità tra le analisi di best – fitting ed il metodo di *Sulem et al* al fine di studiare la stabilità o instabilità di un sistema di monitoraggio. In particolare, a tal proposito, si nota che se dalle analisi di best-fitting si ottiene un estensimetro che segue una legge esponenziale, questo risultato viene confermato dal modello di *Sulem et al.* con andamenti degli spostamenti attesi sovrapposti. Invece, se dalle analisi di best-fitting si ottiene un estensimetro che segue una legge di potenza, questo risultato viene confermato dal modello di *Sulem et al.* con andamenti degli spostamenti attesi che crescono per ogni mese di osservazione.

4 Modellazione agli elementi finiti dell'impianto idroelettrico

In questo capitolo si procede alla modellazione agli elementi finiti dell'impianto idroelettrico oggetto di studio. La modellazione viene condotta tramite l'ausilio del software *RS3*, molto utilizzato nel campo dell'ingegneria geotecnica. In particolar modo, al fine di effettuare la modellazione dell'impianto si seguono sette steps, illustrati nel capitolo successivo, utili per la modellazione e, successivamente, si possono visualizzare ed ottenere i risultati desiderati come lo stato tensionale, spostamenti totali, zone plastiche, sollecitazione nei supporti ed altro così da avere una previsione e/o riscontro con la costruzione.

4.1 Software agli elementi finiti RS3

Il software *RS3* (*Rocscience, version 4.017*) è progettato per l'analisi 3D di strutture geotecniche per applicazioni civili e minerarie. Applicabile sia alla roccia che al suolo, *RS3* è un programma di analisi agli elementi finiti dedicato principalmente all'analisi di opere geotecniche. Le caratteristiche più recenti in *RS3* includono l'analisi dinamica e la riduzione automatica della resistenza al taglio.

RS3 include anche una serie di nuovi potenti strumenti di analisi avanzata, tra cui:

- Riduzione della resistenza al taglio (SSR) completamente automatizzata per l'analisi della stabilità della pendenza;
- Migliore analisi delle acque sotterranee per simulare meglio le variazioni di pressione dei pori.

Il software è adatto sia per il terreno che per la roccia e presenta la stessa selezione di modelli di materiali di *RS2*; inoltre, gli utenti possono anche aggiungere modelli di materiali definiti dall'utente. La vasta gamma di caratteristiche di analisi e modelli di materiali consente agli utenti di modellare praticamente qualsiasi problema in ingegneria geotecnica, tra cui:

- Analisi delle infiltrazioni in una diga di terra;
- Tunneling sequenziato in roccia debole;
- Stabilità dei pendii nel suolo e nelle rocce;
- Regolamento di consolidamento;
- Fondazioni di zattere accatastate;

Con l'aggiunta della funzionalità di foro di sonda, la creazione di stratigrafia del suolo complessa e strati non orizzontali è semplice. Utilizzando il nuovo strumento *Borehole Manager*, i profili possono essere importati dai dati di log del foro e applicati al modello.

La geometria del modello tridimensionale è possibile costruirla con strumenti *CAD* o importando file 3D come *Dxfs*. Con una maggiore complessità della geometria, robuste funzionalità di meshing aggiungono precisione e precisione ai risultati dell'analisi, *RS3* consente agli utenti di generare la mesh ad elementi finiti con un solo clic o personalizzarla in base alle specifiche dell'utente. Con un livello più alto di personalizzazione, gli utenti sono in grado di perfezionare la mesh e personalizzare la densità della mesh nelle regioni critiche del modello.

Inoltre, tale software offre una completa flessibilità per la messa in scena di scavi, installazione di supporto, carico e tutti gli altri aspetti di modellazione. Modelli con diverse centinaia di stadi possono essere analizzati. Con *RS3*, l'interfaccia di modellazione è stata completamente riprogettata per fornire modelli *3D*. Questo significa che gli utenti hanno libertà nelle forme, orientamenti, geometrie di superficie, e altro ancora. Modello di miniere a cielo aperto, tunnel, strutture di superficie, elementi sotterranei e molto altro ancora. Gli strati non orizzontali, il cross-tunneling e le superfici complesse possono essere incorporati facilmente nello stesso modello.

Dopo il calcolo dell'analisi, RS3 offre numerose opzioni per la visualizzazione e la visualizzazione dei risultati in $2D \ e \ 3D$ (ad esempio: spostamenti, pressione dei pori, tensioni, vettori di flusso ed altro). È possibile delineare i risultati su superfici di scavo o piani di visualizzazione definiti dall'utente, tracciare i risultati lungo tutte le linee, tracciare dettagliatamente le forze di supporto e gli spostamenti ed individuare i risultati differenziali tra le fasi. I risultati e le immagini possono essere esportati e personalizzati per presentazioni e report.

Generalmente, la modellazione agli elementi finiti risulta essere suddivisa nei seguenti steps:

- 1. si definisce il dominio e la geometria del modello con possibili vari stages;
- 2. si definiscono i materiali e le loro proprietà;
- si imposta lo stato tensionale, ponendo attenzione a due casi: scavo superficiale, dove generalmente si considera uno stato tensionale lineare o scavo profondo, dove, invece, si considera uno stato tensionale costante;
- 4. si discretizza il modello, creando delle mesh. Spesso, è possibile generare tali mesh tramite il comando automatico presente nel software; è sempre buona norma controllare la qualità delle mesh ed eventualmente intervenire nelle parti dove si vuole infittire con più dettaglio la mesh;
- 5. definizione delle condizioni al contorno, dove si definiscono tali condizioni in termini di spostamenti (lungo x, y e z) ed in termini di forze;
- si computa il modello, ottenendo tramite il software le fasi computazionali ed i dettagli del processo di interazione, come tolleranza e numero di passi, che danno l'indicazione di quando il processo è terminato;
- 7. interpretazione dei risultati, dove si analizzano i risultati ottenuti.

Questa semplici passaggi permettono di costruire il modello *FEM (finite element method)* con software commerciali.

4.2 Modellazione dell'impianto idroelettrico

4.2.1 Geometria dell'impianto idroelettrico

L'impianto idroelettrico, come già illustrato nel capitolo 1.2 presentazione caso studio, Figura 1.2.1, è composto dalla caverna Penstock Branches, dove converge l'acqua dal bacino superiore, dalle due caverne fondamentali contenenti le turbine ed i trasformatori, Powerhouse e TrasformerHall, dalle caverne di connessione Busbar Tunnel, Old e New Main Acces Tunnel e dalle rimanenti caverne Pilot Tunnels, e Draft Tubes.

Al fine di costruire il modello sul software *RS3* è importante conoscere le varie fasi di scavo così da definire gli stages. In particolare, si definisce il dominio dell'impianto idroelettrico pari a circa 4-5 volte il diametro equivalente della PH e 9 stages per la costruzione dell'impianto idroelettrico. Di seguito vengono riportati la geometria e gli scavi effettuati senza visualizzare i sistemi di supporto, i quali sono illustrati nel capitolo successivo *4.2.4 Modello dell'impianto idroelettrico con i supporti*.

1. Initializzation, condizione geostatica dove non si considerano scavi effettuati (Figura 4.2.1.1);



Figura 4.2.1.1 Stage 1



2. I layer PH, dove viene scavata la calotta della Powerhouse (Figura 4.2.1.2);

Figura 4.2.1.2 Stage 2

3. Il layer PH, dove viene scavata la parte al di sotto della calotta e la Transformer Hall (Figura 4.2.1.3);



Figura 4.2.1.3 Stage 3





Figura 4.2.1.5 Stage 4

5. III - 11 layer PH, dove viene scavata ancora un'altra parte della Powerhouse (Figura 4.1.2.6);



Figura 4.2.1.6 Stage 5

 III – 2 layer PH, dove viene scavata un'altra parte sottostante della Powerhouse ed anche il New Main Access Tunnel (Figura 4.2.1.7);



Figura 4.2.1.7 Stage 6

7. IV layer PH, dove viene scavata un'altra parte della Powerhouse (Figura 4.2.1.8);



Figura 4.2.1.8 Stage 7



8. V layer PH, dove viene scavata la Penstock Branches e la penultima parte della Powerhouse (Figura 4.2.1.9);

Figura 4.2.1.9 Stage 8

9. Completion PH, dove si completa lo scavo della Powerhouse (Figura 4.2.1.10);



Figura 4.2.1.10 Stage 9

Dunque, alla luce degli stages precedentemente illustrati, si può notare che lo scavo complessivo della *Powerhouse* viene effettuato in 6 fasi.

4.2.2 Modello geomeccanico della Powerhouse

La litologia della Powerhouse è principalmente composta da tre strati e con presenza di faglie. In generale.

La stratigrafia è così definita:

- *BS strong layer*, basalto denso, da forte a molto forte, esposto sulla parete sospesa di F22 e sopra lo strato di Pyr. Tale strato è indicato con il colore giallo;
- *BS weak layer*, basalto prevalentemente vescicolare a media resistenza, localmente basalto con tufo a media e bassa resistenza e localmente denso basalto, struttura pahoehoehoe di massa rocciosa, esposto sulla parete del muro di fondo di F22, parete sospesa di F22 e sotto lo strato di Pyr; questo materiale è indicato con il colore verde;
- *Pyroclastic layer (pyr)*, principalmente di tufo puro, tra cui i Pyr esposti alla parete terminale nord, alla parete a monte e alla parete a valle, e il tufo frazionario localmente sottile esposto alla parete a monte. Lo spessore di Pyr è di circa 0.3m-2.0m. Tale materiale è indicato con il colore rosso;
- Le faglie F16, F18, F22, F22-1, F30, F31, F46, F50, F51, F55, F57, F62, F65, F66, F67, F69 e F73 indicate con le fasce rosse.

In Figura 4.2.2.1 ed in Figura 4.2.2.2 si riportano le sezioni geologiche upstream e downstream della Powerhouse.



Figura 4.2.2.1 Sezione geologica upstream della Powerhouse



Figura 4.2.2.2 Sezione geologica downstream della Powerhouse

Secondo le informazioni geologiche (*Figura 4.2.2.1 e Figura 4.2.2.2*) relative all'area della *Powerhouse*, vi sono le faglie *F16, F18, F22, F22-1, F30, F31, F46, F50, F51, F55, F57, F62, F65, F66, F67, F69 e F73.* Inoltre, *in Figura 4.2.2.1* sono indicate due zone di deformazione, denominate come *D1* e *D4*, nel terzo strato della Powerhouse. Si nota che una forte zona di deformazione *D4* può essere osservata al fondo dello strato *Pyr*, visibile a destra della figura, e che la resistenza del materiale di tufo deformato all'interno di questa zona di deformazione è molto debole o estremamente debole. Infine, sono state fornite delle proporzioni per area di ciascuna classificazione dell'ammasso roccioso. La classificazione è principalmente *Classe IV* (74%) povera, in parte *Classe III* (18%) forte, localmente *Classe V* (8%) molto povera.

Il profilo di longitudine geologica lungo l'asse della Powerhouse è mostrato nella Figura 4.2.2.3.



Figura 4.2.2.3 Profilo di longitudine geologica dell'asse del Powerhouse

In *Figura 4.2.2.4* si può notare il modello *3D* della Powerhouse con la stratigrafia, dove la formazione di roccia principale è il *Pyr*, che attraverso prove sperimentali sono state fornite tre classi (3, 6), il *bs-strong* compreso tra il (3, e) e de anche tra (6, e) degli strati di *Pyr* ed il *bs weak* sotto lo strato (9) di *Pry*, nella parte bassa della *Powerhouse*. In *Figura 4.2.2.5*, invece, si riporta il modello tridimensionale completo con la presenza della faglia F16.



Figura 4.2.2.4 Modello geologico tridimensionale della litologia della centrale elettrica



Figura 4.2.2.5 Modello geologico tridimensionale della centrale elettrica (classe V)

Illustrata la configurazione geologica dell'impianto idroelettrico, è importante definire i parametri geo meccanici. Generalmente, i criteri di rottura di *Hoek-Brown (2002)* e *Mohr-Coulomb (1773)* sono quelli più comunemente utilizzati per rappresentare il comportamento dell'ammasso roccioso in termini di resistenza; i relativi parametri sono stimati a partire dalle prove di laboratorio su campioni di roccia estratti.

Al fine di ricavare i parametri utili per il criterio di *Mohr-Coulomb*, si può operare una linearizzazione del criterio non lineare di Hoek e Brown, seguendo la procedura (*Hoek-Brown, 1997*):

a) Conoscendo l'indice di qualità della roccia (GSI), si stimano i parametri del criterio di Hoek-Brown (UCS, m_b , se a) a partire dai risultati delle prove di laboratorio, mediante le seguenti formulazioni:

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D}}$$
 (eq. 7)

$$s_b = e^{\frac{GSI-100}{9-3\cdot D}}$$
 (eq. 8)

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$$
 (eq. 9)

dove *UCS*, *uniaxial comprensive strenght*, è la tensione uniassiale; *GSI*, *Geological strenght index*, è un'indice di qualità della roccia; m_i è un parametro di Hoek Brown; D è il grado di disturbo, pari a zero; E è il modulo elastico; c è la coesione e φ è l'angolo di attrito.

b) Successivamente, si ricavano i valori delle tensioni σ_1 e σ_3 per 8 punti appartenenti all'inviluppo di rottura, ottenuti dividendo l'intervallo compreso fra $\sigma_3 = 0$ e $\sigma_3 = 0,25 UCS$ in 8 parti uguali (*Figura* 4.2.2.6).



Figura 4.2.2.6 Linearizzazione del criterio di Hoek - Brown

- c) Al fine di ricavare i parametri di resistenza di *Mohr-Coulomb* sul piano (σ_1 - σ_3), si attua un'interpolazione lineare di questi 8 punti ottenendo i valori dell'intercetta e della pendenza, i quali sono i parametri cercati, indicati rispettivamente con $C_0 \in N\varphi$.
- d) Infine, si definisce il criterio di *Mohr-Coulomb* sul piano (σ - τ), ricavando la coesione c e l'angolo d'attrito φ dalle seguenti relazioni:

$$c_0 = \frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{eq. 10}$$

$$N_{\varphi} = \frac{1 + sen\varphi}{1 - sen\varphi} = tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$$
(eq. 11)

Inoltre, è possibile stimare il modulo di deformabilità dell'ammasso roccioso attraverso diverse formulazioni empiriche presenti in letteratura. Di seguito si riportano le formulazioni empiriche considerate, a seconda del valore di σ_{ci} =UCS:

$$E_{d} = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \qquad \qquad \sigma_{ci} < 100 \text{ MPa (Hoek & Brown, 1997)}$$
$$E_{d} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \qquad \qquad \sigma_{ci} > 100 \text{ MPa (Hoek & Brown, 1997)}$$

Si utilizzano due leggi costitutive per gli strati che definiscono la litologia della Powerhouse:

- *elastica perfettamente plastica*, il cui andamento dal punto di vista teorico risulta essere lineare (fase elastica) fino al raggiungimento del punto di snervamento e da questo punto in poi si entra in fase plastica con tensione costante ed aumento delle deformazioni. Per quanto riguarda la coesione e l'angolo di attrito, invece, rimangono costanti. Tale legge è utilizzata per *bs-weak V e pyroclastic V*.
- elastico-plastico rammollente, il cui andamento dal punto di vista teorico risulta essere lineare (fase elastica) fino al raggiungimento del punto di snervamento e da questo punto in poi vi è un ramo discendente fino alle condizioni residue. Per quanto riguarda la coesione e l'angolo di attrito, partono dal valore di picco con un ramo discendente fino ai valori residui. Tale legge è utilizzata per *bs-strong III, bs-weak IV* e *bs-weak V*, con valore di coesione diversi tra picco e residuo e, invece, diversamente da quanto descritto dal punto di vista teorico, si è deciso di non variare il valore dell'angolo di attrito e dunque di considerarlo costante.



In Figura 4.2.2.7 si riportano gli andamenti delle due leggi costitutive, della coesione e dell'angolo di attrito.

Figura 4.2.2.7 Leggi costitutive

Dunque, si riportano in *Tabella 4.2.2.1* i parametri geo meccanici ottenuti per i tre tipi di strati *bs-weak*, *bs-strong* e *pyr*.

Litologia	UCS [MPa]	GSI	mi	D	m _b	s _b	α	E [MPa]	c [MPa]	φ [°]		
bs-weak V	16,60	18	20	0	1,07	0,00011	0,55	1,18	0,70	19,76		
pyroclastic	8,80	34	12	0	1,14	0,00065	0,52	0,65	0,77	23,49		
Litologia	LICS [MD ₂]	GSI	m	п	m	C .	2	F [MPa]	Parametri	di picco	Parametri	residui
Enologia		UDI	₁		ш _b	з _b	ũ		c [MPa]	φ [°]	c [MPa]	φ [°]
bs-strong III	101,30	45	25	0	3,51	0,00222	0,51	7,50	2,70	47,01	0	47,01
bs-weak III	50,81	43	25	0	3,26	0,00178	0,51	2,05	2,05	41,08	0	41,08
bs-weak IV	33,90	39	20	0	2,26	0,00114	0,51	1,55	1,55	34,80	0	34,80

Tabella 4.2.2.1 Parametri geomeccanici

In Tabella 4.2.2.2 si riportano i valori di coesione ed angolo di attrito riferiti alle faglie.

Faglia	Riempimento	c' [MPa]	φ [°]
F16, F18, F22, F22-1, F30, F31, F46, F50, F51, F55, F57, F62, F65, F66, F67, F69,F73	breccia basaltica argillosa	0,1	23

Infine, dal momento che il modello risulta essere profondo, si considera uno stato tensionale naturale costante con σ_1 che è la tensione orizzontale massima principale, uguale a 15 MPa, σ_2 che è la tensione verticale principale, uguale a 10 MPa e σ_3 che è la tensione orizzontale minima uguale a 7 MPa. In generale, $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$.

In Figura 4.2.2.8 si può notare il dominio del modello 3D geometrico e geomeccanico dell'impianto idroelettrico.



Figura 4.2.2.8 Modello 3D dell'impianto idroelettrico

4.2.3 Mesh e condizioni al contorno

Costruito il modello geometrico e definiti i materiali, si procede al settaggio della mesh del modello. Il software *RS3* prevede la costruzione di una griglia di punti a maglie quadrilatere. Le grandezze vettoriali come spostamenti, velocità, forze ed altro, sono calcolate in corrispondenza dei punti della griglia, chiamati nodi, e non all'interno degli elementi. Le grandezze scalari come tensioni, parametri di resistenza, parametri di deformabilità ed altro, sono, invece, definite nelle zone interne degli elementi (baricentro).

Sono stati utilizzati *4 Nodi* come tipo di elemento, di forma rettangolare, e *graded* come gradazione delle mesh. In *Figura 4.2.3.1* si riportano le varie viste dell'impianto idroelettrico con la mesh. In particolare, si può notare come la mesh sia più fitta in corrispondenza delle caverne e della faglia e, allontanandosi da queste, le dimensioni della mesh vanno via via crescendo. Tale scelta è legata al fatto che in queste zone vi sono delle criticità legate alla presenza di diversi materiali, con diversi parametri, ed alla connessione di ogni caverna.



Figura 4.2.3.1 Mesh

Le condizioni al contorno sono definite sul software tramite l'ausilio *restrains underground automatically*, che automaticamente definisce le condizioni al contorno per il caso in esame, bloccando correttamente gli spostamenti lungo le tre direzioni x, y e z (*Figura 4.2.3.2*). E' sempre buona norma controllare che le condizioni a contorno siano idonee per il caso studio.



Figura 4.2.3.2 Condizioni al contorno

e

4.2.4 Modello dell'impianto idroelettrico con i supporti

La descrizione dettagliata della disposizione dei supporti della *Powerhouse* e *Transformer Hall* sono mostrati in *Figura* 4.2.4.1. In particolare, si può notare che:

- nella *Powerhouse* è previsto un rivestimento costituito da uno strato di calcestruzzo nelle calotte con spessore di 20/25 cm, e nei piedritti, con spessore di 15/35 cm. Inoltre, sia nei piedritti che nella calotta, sono presenti tiranti (*tendons, bar anchors*) e chiodi (*rock dowels*) con diverse capacità e lunghezze;
- nella *Transformer Hall* il rivestimento di calcestruzzo ha spessore di 12 cm. Si prevedono inoltre chiodi (*rock dowels*) con diverse capacità e lunghezze a seconda della posizione della caverna piedritti o calotta.



Figura 4.2.4.1 Modello geometrico dell'impianto idroelettrico con i supporti (tiranti e rivestimento di cls)

Di seguito, in *Figura 4.2.4.2*, si riporta il modello con i sistemi di supporti (tiranti e rivestimento in calcestruzzo) della *Powerhouse* e della *Transformer hall*. In *Figura 5.2.4.3* e *5.2.4.4* si riportano, rispettivamente, *Tendons - bar anchors* e *Rock Dowels*. Nel presente lavoro, come già rimarcato nei capitoli precedenti, si analizza solo la *Powerhouse*.



Figura 4.2.4.2 Modello con i sistemi di supporti (tiranti e rivestimento del calcestruzzo) della Powerhouse e della Transformer hall



Figura 4.2.4.3 Tendons - bar anchors


Figura 4.2.4.4 Rock Dowels

4.3 Risultati dell'impianto idroelettrico

Nel seguito si riportano, per la Powerhouse:

- stato tensionale;
- spostamenti totali ed eventuali zone plastiche nelle pareti;
- Spostamenti del rivestimento del calcestruzzo lungo una direzione;
- Sollecitazioni nei tiranti e nei chiodi.

4.3.1 Stato tensionale

Generalmente, il primo risultato che si ritiene opportuno controllare, al fine di avere una corretta modellazione, è lo stato tensionale geostatico, *stage 1*, ovvero che il volume di ammasso roccioso sede dell'impianto idroelettrico sia soggetto alle tre tensioni principali stabilite in fase di modellazione. In *Figura 4.3.1.1, Figura* 4.3.1.2 e *Figura 4.3.1.3* si può osservare lo stato tensionale iniziale.



Figura 4.3.1.1 Stato tensionale: σ_1



Figura 4.3.1.2 Stato tensionale: σ_2



Figura 4.3.1.3 Stato tensionale: σ_3

4.3.2 Spostamenti totali e zone plastiche nelle pareti

In questo capitolo si pone attenzione agli spostamenti totali ottenuti in parete tramite la modellazione; essi sono illustrati nelle *Figure 4.3.2.1, 4.3.2.2, 5.3.2.3* e 4*.3.2.4*.

Dai risultati ottenuti si può evincere che:

- sulla parete upstream vi sono, in alcune zone, degli spostamenti totali quasi nulli e, nella parte destra/centrale, degli spostamenti notevoli; in particolare, lo spostamento massimo è di 0,310 m.
- sulla parete sud, invece, gli spostamenti sono perlopiù abbastanza piccoli/nulli, compresi tra 0 e 0,031 m;
- sulla parete downstream vi sono, anche, degli spostamenti nulli in alcune zone ed in altre, invece, gli spostamenti massimi sono uguali 0,180 m;
- sulla parete nord, invece, vi sono complessivamente degli spostamenti compresi tra 0,031 e 0,190 m.



Figura 4.3.2.1 Spostamenti sulle pareti upstream – sud della PH



Figura 4.3.2.2 Spostamenti sulle pareti downstream – sud della PH



Figura 4.3.2.3 Spostamenti sulle pareti downstream – nord della PH



Figura 4.3.2.4 Spostamenti sulle pareti upstream – nord della PH

Oltre agli spostamenti, è utile visualizzare le zone plastiche presenti nella PH. In *Figura 4.3.2.5, 4.3.2.6, 4.3.2.7* e 4*.3.2.8* si riportano le zone plastiche della PH, dove, in particolare, si può notare che le zone plastiche sono maggiormente localizzate nelle pareti upstream, downstream e nord mentre nella parete sud vi sono solo microzone soggette a plasticizzazione.



Figura 4.3.2.5 Zone plastiche sulle pareti upstream – sud della PH



Figura 4.3.2.6 Zone plastiche sulle pareti downstream – sud della PH



Figura 4.3.2.7 Zone plastiche sulle pareti downstream – nord della PH



Figura 4.3.2.8 Zone plastiche sulle pareti upstream – nord della PH

4.3.3 Spostamenti nel rivestimento di calcestruzzo

Gli spostamenti in direzione x del rivestimento in calcestruzzo sono riportati nelle *Figure 4.3.3.1*, 4.3.3.2 *4.3.3.3* e 4.3.3.4.

Per la parete upstream, gli spostamenti negativi, vista la direzione dell'asse x, indicano degli sposamenti verso l'esterno della PH e, invece, quelli positivi indicano degli spostamenti verso l'interno della PH; mentre, per la parete downstream, gli spostamenti negativi indicano quelli verso l'interno della PH e gli spostamenti positivi sono quelli verso l'esterno.

In particolare, si evince che:

- sulla parete upstream, vi sono complessivamente degli spostamenti del rivestimento verso l'interno della PH compresi tra 0,011 e 0,303 m; in particolare, il valore massimo di tale spostamento, uguale a 0,303 m è localizzato proprio nella stessa zona dove vi sono gli spostamenti totali massimi;
- sulla parete sud, gli spostamenti del rivestimento del calcestruzzo sono, anche, positivi e pari a 0,108 m;
- sulla parete downstream, invece, vi sono degli spostamenti positivi e negativi del rivestimento compresi tra -0,135 e 0,108 m;
- sulla parete nord, come per la parete sud, gli spostamenti del rivestimento del calcestruzzo sono positivi e pari a 0,108 m.



Figura 4.3.3.1 Spostamenti del lining sulle pareti upstream – sud della PH



Figura 4.3.3.2 Spostamenti del lining sulle pareti downstream – sud della PH



Figura 4.3.3.3 Spostamenti del lining sulle pareti downstream – nord della PH



Figura 4.3.3.4 Spostamenti del lining sulle pareti upstream – nord della PH

4.3.4 Sollecitazioni nei tiranti e nei chiodi della PH

Si riportano in *Figura 4.3.4.1* e *Figura 4.3.4.2* le forze sui *Tendons* e *bar anchors* ed in *Figura 4.3.4.3* e *Figura 4.3.4.4* le tensioni assiali sui *rock dowels*.

Dai risultati ottenuti si può notare che:

- I tiranti (tendons e bar anchors) complessivamente hanno dei valori di forza assiale compresi nell'intervallo 0,2 : -1,8 MN, con valori negativi rispetto all'asse x. In particolare, nella parete upstream i valori massimi delle forze sono concentrate dove vi sono gli spostamenti totali massimi e le zone plastiche; i valori di tali sollecitazioni sono compresi tra -1,1 e -1,8 MN. Nella parete sud, invece, i valori massimi sono inferiori e compresi tra 0,2 e -0,8 MN. Nella parete downstream si possono notare valori di forze, leggermente inferiori a quelli della parete upstream, compresi tra 0,2 e -1,3 MN e, infine, nella parete nord si nota che i valori delle forze assiali sono simili a quelli della parete sud;
- I chiodi (*rock dowels*) complessivamente hanno dei valori di tensione compresi tra 0 e -650 MPa, con valori negativi rispetto all'asse x. In particolare, per ogni parete della PH i valori massimi sono concentrati dove vi sono gli spostamenti totali massimi e, anche, dove si concentrano le zone plastiche. Dettagliatamente, per la parete upstream le tensioni più alte sono concentrate nella parte centrale/destra con valori compresi tra -455 e -585 MPa. Nella parete sud, si ottengono dei valori orientativamente simili. Anche nella parete nord e downstream si hanno dei valori compresi nello stesso range ma, diversamente alle due pareti prima trattate, tali valori sono presenti in quasi tutti i chiodi presenti.



Figura 4.3.4.1 Forze sui Tendons e bar anchors sulla parete upstream – sud della PH



Figura 4.3.4.2 Forze sui Tendons e bar anchors sulla parete downstream – nord della PH



Figura 4.3.4.3 Tensioni assiali sui rock dowels sulle pareti upstream – nord della PH



Figura 4.3.4.4 Tensioni assiali sui rock dowels sulle pareti downstream - sud della PH

4.3.5 Interpretazione dei risultati ottenuti dalla modellazione 3D

Alla luce dei risultati ottenuti, inizialmente si può notare che l'ammasso roccioso è soggetto alle tre tensioni principali definite in fase di modellazione. Tale risultato è fondamentale al fine di avere una corretta modellazione.

Per quanto riguarda gli spostamenti totali e le zone plastiche, vi è una coerenza dei risultati dal momento che dove vi sono aree delle pareti con valori di spostamenti elevati vi sono anche notevoli zone plastiche. In particolare, nella parete upstream della Powerhouse, gli spostamenti totali massimi sono concentrati in un'area sopra le condotte forzate (*Penstock Branches*); questo risultato potrebbe essere legato agli scavi di tali caverne. La parete nord ha dei valori inferiori di spostamenti concentrati nel primo strato della Powerhouse. La parete downstream, invece, ha degli spostamenti totali massimi localizzati in un'area vicino alle caverne di collegamento (*Busbar Tunnel*); anche questo risultato, come per la parete upstream, potrebbe essere legato ai vari scavi di queste caverne. La parete sud è l'unica con valori di spostamenti totali e zone plastiche inferiori rispetto alle altre tre pareti.

Infine, per i sistemi di supporto (rivestimento di calcestruzzo, tiranti e chiodi) si ottengono dei valori ragionevoli e coerenti con i risultati di spostamenti totali e zone plastiche in ogni parete della Powerhouse. In particolare, gli spostamenti nel rivestimento di calcestruzzo in direzione x sono coerenti con i risultati descritti prima (spostamenti totali e zone plastiche) dal momento che i valori massimi sono concentrati nelle stesse aree. Tale risultato è ottimo visto che il rivestimento è previsto al fine di avere una buona risposta strutturale della Powerhouse lungo le sue pareti. I tiranti (*tendons e bar anchors*), nelle quattro pareti della Powerhouse, hanno i valori massimi delle forze concentrati nelle aree dove vi sono gli spostamenti totali massimi e le zone plastiche ed i chiodi (*rock dowels*), invece, hanno i valori massimi di tensione in queste stesse aree. Quest'ultimo risultato è importante dal momento che questi valori massimi di forze e tensione indicano che queste aree delle Powerhouse, come già visto, sono soggette a maggiori spostamenti totali. Dunque, al fine di rendere stabile la Powerhouse ed evitare fenomeni di collasso, i sistemi di supporto rispondono con questi valori di sollecitazioni con direzione opposta così da evitare questi fenomeni che potrebbero causare l'instabilità totale di una o più parete della Powerhouse.

Conclusioni

La costruzione dell'impianto idroelettrico oggetto della presente tesi è iniziata orientativamente nel 2018 ed ancora oggi, vi sono ulteriori interventi in corso in varie parti delle caverne di collegamento. Al fine di studiare la stabilità della *Powerhouse*, dapprima si eseguono delle analisi di best-fitting (esponenziale e di potenza) mediante l'ausilio del software *OriginLab*, dei dati di monitoraggio nel tempo, formulando delle osservazioni a scopo previsionale, su 21 strumenti di monitoraggio: 10 estensimetri e 11 tiranti. Tali estensimetri e tiranti sono stati selezionati lungo le pareti della Powerhouse ad una stessa quota al fine di avere, dopo le analisi, una visione puntuale e globale del comportamento atteso in termini di spostamenti e forze.

Dai risultati ottenuti è possibile osservare che:

- la parete laterale della Powerhouse (Upstream) estensimetri, risulta complessivamente stabile;
- la parete laterale della Powerhouse *(Downstream) estensimetri*, risulta complessivamente instabile e questo risultato può essere collegato agli ulteriori scavi effettuati alla base delle caverne di collegamento *(Busbar Tunnel)* che, vista la loro disposizione, influenzano notevolmente la parete downstream;
- la parete laterale della Powerhouse (*Upstream*) *tiranti*, risulta complessivamente stabile. Un'importante osservazione è che tale risultato è coerente con il risultato degli estensimetri localizzati lungo la stessa parete di studio;
- la parete laterale della *Powerhouse (Downstream) tiranti,* risulta complessivamente instabile. Anche in questo particolare caso, un'importante osservazione è che tale risultato è coerente con gli estensimetri localizzati lungo la stessa parete di studio;
- le pareti laterali della Powerhouse (Sud e Nord) tiranti, risultano complessivamente stabili.

Dunque, complessivamente, si può notare che la *Powerhouse* ad oggi, nel mese di giugno 2021, risulta stabile lungo le pareti laterale upstream, nord e sud, mentre è instabile lungo la parete downstream.

Successivamente, si applica il modello di *Sulem et al. (1987)* al fine di ottenere delle affinità con le analisi di best – fitting. Tale modello di *Sulem et al. (1987)*, consente di stimare la convergenza di un tunnel con sezione circolare, con roccia intorno al tunnel omogenea ed isotropa, e scavo profondo considerando che la distribuzione delle tensioni è omogenea. In particolare, è possibile tenere in considerazione sia l'effetto di allontanamento del fronte ($C_1(x)$), sia il comportamento tempo-dipendente del mezzo sottoposto allo scavo ($C_2(t)$). Al fine di applicare questo modello, si ipotizza un raggio equivalente della *Powerhouse* e si considerano due estensimetri *Mph* - L0 + 34 - 5 - 3 e *Mph* - L0 + 47 - 8 - 4, rispettivamente stabile ed instabile, localizzati nella sezione *Upstream* e *Downstream* della *Powerhouse* Si considerano questi due estensimetri per ricavare, prima, i parametri incogniti del modello ($C_{inf,x}$, m, T) utili per ricavare la convergenza e, dunque, gli spostamenti e, dopo, visualizzare delle eventuali affinità con le analisi di best - fitting. In questo caso studio, si considera solo il comportamento tempo-dipendente del mezzo sottoposto allo scavo ($C_2(t)$).

Alla luce dei risultati ottenuti, si nota che considerando l'estensimetro Mph - L0 + 34 - 5 - 3, i parametri ($C_{inf,x}$, *m*, *T*) sono quasi simili per ogni mese. Inoltre, si notano degli spostamenti attesi, ottenuti con il metodo di *Sulem et al.*, sovrapposti per ogni mese di osservazione e complessivamente sono leggermente maggiori rispetto agli spostamenti attesi ottenuti con legge esponenziale. Questo risultato potrebbe essere correlato al fatto che, come già detto, con l'approccio di *Sulem* si considera il comportamento tempo-dipendente del mezzo sottoposto allo scavo. Invece, per quanto riguarda l'estensimetro Mph - R0 + 47 - 8 - 4, si nota che i parametri ($C_{inf,x}, m, T$) sono simili solo per aprile e maggio 2021 dal momento che tale estensimetro risulta essere, proprio in questi mesi, stabile. Invece, nel mese di marzo e giugno è instabile e tali parametri sono diversi e, in particolare, aumentano. Anche per questo estensimetro, si notano degli spostamenti attesi ottenuti con il metodo di *Sulem et al.* leggermente maggiori a quelli ricavati con le analisi di best – fitting (legge esponenziale). Inoltre, gli spostamenti ottenuti con l'approccio di *Sulem* sono sovrapposti solo per il mese di aprile e maggio 2021 e valori superiori per il mese di giugno 2021.

Dunque, un'importante risultato è la presenza di un'affinità tra le analisi di best – fitting ed il metodo di *Sulem et al* al fine di studiare la stabilità o instabilità di un sistema di monitoraggio, dove:

- se dalle analisi di best-fitting si ottiene un estensimetro che segue una legge esponenziale, questo risultato viene confermato dal modello di *Sulem et al.* con andamenti degli spostamenti attesi sovrapposti;
- se, invece, dalle analisi di best-fitting si ottiene un estensimetro che segue una legge di potenza, questo risultato viene confermato dal modello di *Sulem et al.* con andamenti degli spostamenti attesi che crescono per ogni mese di osservazione.

Infine, si procede alla modellazione numerica dell'impianto idroelettrico mediante l'impianto degli elementi finiti (3D) al fine di analizzare lo stato tensionale e deformativo della PH, la generazione di eventuali zone plastiche nelle pareti, gli spostamenti nel rivestimento di calcestruzzo e le sollecitazioni nei tiranti.

Inizialmente si nota il volume dell'ammasso roccioso è soggetto alle tre tensioni principali (σ_1 , $\sigma_2 e \sigma_3$) definite in fase di modellazione. Questo risultato è fondamentale perché dimostra una corretta modellazione. Per quanto riguarda lo stato deformativo e la generazione di eventuali zone plastiche nelle pareti, vi è una coerenza dei risultati dal momento che dove vi sono aree delle pareti con valori di spostamenti elevati vi sono ragionevolmente anche zone plastiche.

Analizzando le pareti della Powerhouse sotto questi due aspetti, si nota che:

- nella parete upstream della Powerhouse, gli spostamenti totali massimi sono concentrati in un'area sopra le condotte forzate (*Penstock Branches*); questo risultato potrebbe essere legato agli scavi di tali caverne;
- la parete nord ha dei valori inferiori di spostamenti concentrati nel primo strato della Powerhouse;
- la parete downstream, invece, ha degli spostamenti totali massimi localizzati in un'area vicino alle caverne di collegamento (*Busbar Tunnel*); anche questo risultato, come per la parete upstream, potrebbe essere legato ai vari scavi di queste caverne;
- la parete sud è l'unica con valori di spostamenti totali e zone plastiche inferiori rispetto alle altre tre pareti.

Invece, per i sistemi di supporto progettati per la Powerhouse (rivestimento di calcestruzzo, tiranti e chiodi) si possono notare anche dei valori ragionevoli e coerenti con i risultati di spostamenti totali e zone plastiche in ogni parete della Powerhouse. Nel dettaglio,

- gli spostamenti nel rivestimento di calcestruzzo, visualizzati nella direzione x, sono connessi con i risultati degli spostamenti totali e zone plastiche visto che i valori massimi sono concentrati nelle stesse aree. Tale risultato era prevedibile, dal momento che il rivestimento è progettato al fine di avere una buona risposta strutturale della Powerhouse lungo le sue pareti.
- i tiranti (*tendons e bar anchors*), localizzati nelle pareti della Powerhouse, hanno i valori massimi delle forze nelle aree dove vi sono gli spostamenti totali massimi e le zone plastiche; i chiodi (*rock dowels*), invece, hanno i valori massimi di tensione in queste stesse aree. Tali valori di forze e tensione indicano che queste aree della Powerhouse sono soggette notevoli spostamenti totali.

Pertanto, al fine di rendere stabile la Powerhouse ed evitare fenomeni di collasso, i sistemi di supporto rispondono con degli spostamenti, forze e tensioni così da prevenire tali fenomeni che potrebbero causare l'instabilità di queste aree della Powerhouse, che potrebbero influenzare la totale stabilità della parete, fino a quando non raggiungono il loro punto di instabilità strumentale.

In conclusione, si può notare che il seguente studio risulta essere complessivamente legato nelle tre fasi effettuate. A partire dalle analisi di best – fitting, dove si studia la stabilità o instabilità dei sistemi di monitoraggio, si possono notare i valori massimi di spostamenti e tiranti nella parete upstream della PH rispetto alle pareti downstream, nord e sud; il modello di *Sulem et al.* è utilizzato per integrare maggiori informazioni alle analisi di best-fitting e per confermare la tendenza dei sistemi di supporti; infine, con la modellazione 3D agli elementi finiti si visualizza un comportamento globale della PH.

Dunque, possibili interventi futuri del presente caso studio potrebbero essere:

- aggiornamento dei dati di monitoraggio dal mese di luglio in poi al fine di osservare mensilmente il comportamento di ogni strumento di misura;
- integrare i dati di monitoraggio delle altre caverne e di effettuare anche su di esse delle analisi di bestfitting;
- prestare attenzione allo stato deformativo, come il creep, tramite modelli reologici per avere maggiori informazioni da integrarle con le analisi di best-fitting ed il modello di *Sulem et al.;*
- integrare altri dati di monitoraggio di estensimetri e tiranti nelle zone dove, grazie alla modellazione 3D, vi sono delle zone critiche; per esempio, considerati ulteriori dati di monitoraggio nella zona centrale/destra della parete upstream della PH;
- modellare ed analizzare tutto l'impianto idroelettrico per avere un quadro completo dell'opera.

Allegato 1 Dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle analisi di best – fitting degli estensimetri della parete upstream della PH



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	22,74534 ± 0,03548
A1	-4,02907 ± 0,03299
t1	135,46216 ± 1,8724
Reduced Chi-Sqr	0,00419
R-Square (COD)	0,99216
Adj. R-Square	0,99215

General model Power2:
$f(x) = a^*x^b + c$
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 0.07779 (0.07373, 0.08185)
b = 0.7246 (0.7147, 0.7345)
c = 18.62 (18.6, 18.64)
Goodness of fit:
SSE: 18.82
R-square: 0.988
Adjusted R-square: 0.988
RMSE: 0.07999

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	22,42564 ± 0,01452
A1	-3,69814 ± 0,01219
t1	123,7811 ± 1,0193
Reduced Chi-Sqr	0,00944
R-Square (COD)	0,98749
Adj. R-Square	0,98748

Fitting 24/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp}(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	21,91294 ± 0,00905
A1	-3,25794 ± 0,00746
t1	94,32273 ± 0,59996
Reduced Chi-Sqr	0,00521
R-Square (COD)	0,9918
Adj. R-Square	0,9918

General model Power2:
$f(x) = a*x^b+c$
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 0.2313 (0.2184, 0.2442)
b = 0.5091 (0.4998, 0.5184)
c = 18.3 (18.27, 18.33)
Goodness of fit:
SSE: 54.78
R-square: 0.9785
Adjusted R-square: 0.9785
RMSE: 0.1168

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	22,53266 ± 0,0099
A1	-3,80572 ± 0,00847
t1	128,62727 ± 0,77453
Reduced Chi-Sqr	0,01157
R-Square (COD)	0,98691
Adj. R-Square	0,9869

General n	nodel Power2:
f(x) =	a*x^b+c
Coefficie	nts (with 95% confidence bounds):
a =	0.1969 (0.1875, 0.2062)
b =	0.5387 (0.5308, 0.5465)
c =	18.37 (18.34, 18.39)
Goodnes	s of fit:
SSE: 58.3	34
R-square	e: 0.9833
Adjuster	d R-square: 0.9833
RMSE: 0	.1122

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^{A}c$
Plot	В
a	17,99945 ± 0,0218
b	0,38725 ± 0,01027
С	0,42552 ± 0,00397
Reduced Chi-Sqr	0,02442
R-Square (COD)	0,97236
Adj. R-Square	0,97235

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} +$
Plot	В
уО	$22,69574 \pm 0,0106$
A1	-3,9512 ± 0,00896
t1	$138,3567 \pm 0,8596$
Reduced Chi-S	0,01318
R-Square (COD	0,98612
Adj. R-Square	0,98611

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	В
a	18,04979 ± 0,0201
b	0,35418 ± 0,00893
с	0,44106 ± 0,00378
Reduced Chi-Sq	0,02388
R-Square (COD)	0,97484
Adj. R-Square	0,97483



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
у0	50,13224 ± 0,04403
A1	-16,87003 ± 0,03825
t1	92,49679 ± 0,45569
Reduced Chi-Sqr	0,02733
R-Square (COD)	0,99799
Adj. R-Square	0,99799

General model Power2:	
$f(x) = a^*x^b+c$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a = 0.8531 (0.8301, 0.8761)	
b = 0.5816 (0.5767, 0.5865)	
c = 31.92 (31.86, 31.98)	
Goodness of fit:	
SSE: 150.4	
R-square: 0.9962	
Adjusted R-square: 0.9962	
RMSE: 0.227	

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	49,00625 ± 0,01146
A1	-15,89191 ± 0,01007
t1	81,73459 ± 0,16626
Reduced Chi-Sqr	0,0252
R-Square (COD)	0,9985
Adj. R-Square	0,9985

Fitting 24/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	47,35959 ± 0,01393
A1	-14,74683 ± 0,02062
t1	63,45264 ± 0,20011
Reduced Chi-Sqr	0,12388
R-Square (COD)	0,99232
Adj. R-Square	0,99231

General model Power2:
$f(x) = a^*x^b + c$
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = -24.71 (-25.32, -24.1)
b = -0.1751 (-0.1849, -0.1653)
c = 54.04 (53.35, 54.73)
Goodness of fit:
SSE: 1.7e+04
R-square: 0.7365
Adjusted R-square: 0.7363
RMSE: 2.061

Model	ExpDec1
Equation	y = A1 * exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	49,19486 ± 0,00897
A1	-16,02576 ± 0,00863
t1	83,99942 ± 0,14474
Reduced Chi-Sqr	0,02501
R-Square (COD)	0,99856
Adj. R-Square	0,99856

General model Power2:		
f(x) = a	*x^b+c	
Coefficien	ts (with 95% confidence bounds):	
a = 2.563 (2.462, 2.665)		
b = 0.3787 (0.3728, 0.3846)		
c =	29.22 (29.04, 29.39)	
Goodness of fit:		
SSE: 1023		
R-square: 0.9868		
Adjusted R-square: 0.9868		
RMSE: 0.471		

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	B
а	28,20918 ± 0,1060
b	3,30142 ± 0,06548
с	0,33767 ± 0,0028
Reduced Chi-Sqr	0,24811
R-Square (COD)	0,98576
Adj. R-Square	0,98576

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	49,30696 ± 0,00756
A1	-16,09977 ± 0,00795
t1	85,45019 ± 0,13161
Reduced Chi-Sqr	0,02478
R-Square (COD)	0,9986
Adj. R-Square	0,9986

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	В
а	27,286 ± 0,12257
b	4,00799 ± 0,0801
с	0,3079 ± 0,00269
Reduced Chi-Sqr	0,27482
R-Square (COD)	0,98445
Adj. R-Square	0,98445



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y 0	45,56168 ± 0,04409
A1	-9,98318 ± 0,03996
t1	114,0017 ± 0,85165
Reduced Chi-Sqr	0,01223
R-Square (COD)	0,99688
Adj. R-Square	0,99688

General n	nodel Power2:
f(x) =	a*x^b+c
Coefficie	nts (with 95% confidence bounds):
a =	0.3642 (0.3577, 0.3706)
b =	0.6237 (0.6204, 0.6269)
c =	34.94 (34.92, 34.95)
Goodnes	s of fit:
SSE: 17.6	58
R-square	e: 0.9985
Adjusted	d R-square: 0.9985
RMSE: 0	.07783

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	45,91759 ± 0,01433
A1	-10,32553 ± 0,01197
t1	119,81867 ± 0,35601
Reduced Chi-Sqr	0,01044
R-Square (COD)	0,99825
Adj. R-Square	0,99825

Fitting 22/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp}(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	46,15267 ± 0,02238
A1	-10,53366 ± 0,01941
t1	124,60723 ± 0,50561
Reduced Chi-Sqr	0,01102
R-Square (COD)	0,99796
Adj. R-Square	0,99796

General model Power2:		
$f(x) = a^*x^b+c$		
Coefficients (with 95% confidence bounds):		
a = 0.5168 (0.5069, 0.5267)		
b = 0.5563 (0.553, 0.5595)		
c = 34.61 (34.59, 34.64)		
Goodness of fit:		
SSE: 52.54		
R-square: 0.9976		
Adjusted R-square: 0.9976		
RMSE: 0.115		

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	45,71254 ± 0,00943
A1	-10,15393 ± 0,0078
t1	115,30944 ± 0,26027
Reduced Chi-Sqr	0,01027
R-Square (COD)	0,9984
Adj. R-Square	0,99839

General r	nodel Power2:
f(x) =	a*x^b+c
Coefficie	nts (with 95% confidence bounds):
a =	0.7004 (0.6835, 0.7173)
b =	0.5008 (0.4969, 0.5047)
c =	34.26 (34.21, 34.3)
Goodnes	s of fit:
SSE: 123	.4
R-squar	e: 0.9955
Adjuster	d R-square: 0.9955
RMSE: 0	.1637

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	В
a	33,71873 ± 0,03219
b	1,00704 ± 0,01507
с	0,43789 ± 0,00229
Reduced Chi-Sqr	0,04997
R-Square (COD)	0,99219
Adj. R-Square	0,99219

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y$
Plot	В
y0	45,67037 ± 0,00723
A1	-10,11982 ± 0,00612
t1	114,34892 ± 0,2154
Reduced Chi-Sqr	0,00973
R-Square (COD)	0,99853
Adj. R-Square	0,99853

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	В
а	33,30423 ± 0,03943
b	1,26592 ± 0,02005
c	0,39998 ± 0,00232
Reduced Chi-Sqr	0,06398
R-Square (COD)	0,99036
Adj. R-Square	0,99036



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	22,83434 ± 0,01858
A1	-4,15813 ± 0,01517
t1	65,75354 ± 0,68396
Reduced Chi-Sqr	0,01645
R-Square (COD)	0,9844
Adj. R-Square	0,98439

General model Power2:		
$f(x) = a^*x^b+c$		
Coefficients (with 95% confidence bounds):		
a = 0.6367 (0.6158, 0.6575)		
b = 0.4101 (0.4046, 0.4155)		
c = 17.7 (17.66, 17.73)		
Goodness of fit:		
SSE: 19.57		
R-square: 0.9936		
Adjusted R-square: 0.9936		
RMSE: 0.08242		

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
у0	23,63912 ± 0,01179
A1	-4,78286 ± 0,00981
t1	95,95975 ± 0,59935
Reduced Chi-Sqr	0,01714
R-Square (COD)	0,98836
Adj. R-Square	0,98835

Fitting 23/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	23,32041 ± 0,01237
A1	-4,53591 ± 0,01026
t1	83,09668 ± 0,57133
Reduced Chi-Sqr	0,01588
R-Square (COD)	0,98799
Adj. R-Square	0,98799



Model	ExpDec1
Equation	y = A1 * exp(-x/t1) + y
Plot	В
y0	23,80507 ± 0,00925
A1	-4,91047 ± 0,0079
t1	103,19453 ± 0,52302
Reduced Chi-Sqr	0,01606
R-Square (COD)	0,98991
Adj. R-Square	0,98991

General n	nodel Power2:
f(x) =	a*x^b+c
Coefficien	nts (with 95% confidence bounds):
a =	0.8121 (0.794, 0.8302)
b =	0.3675 (0.3642, 0.3708)
C =	17.46 (17.43, 17.49)
Goodnes	s of fit:
SSE: 29.7	77
R-square	e: 0.9957
Adjusted	d R-square: 0.9957
RMSE: 0	.07975

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^{\wedge}c$
Plot	В
а	17,2665 ± 0,01748
b	0,94755 ± 0,01056
С	0,34321 ± 0,00157
Reduced Chi-Sqr	0,00741
R-Square (COD)	0,99535
Adj. R-Square	0,99535

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	23,87654 ± 0,00766
A1	-4,96239 ± 0,00678
t1	106,61735 ± 0,46591
Reduced Chi-Sqr	0,01508
R-Square (COD)	0,99088
Adj. R-Square	0,99087

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
yO	23,87654 ± 0,00766
A1	-4,96239 ± 0,00678
t1	106,61735 ± 0,46591
Reduced Chi-Sqr	0,01508
R-Square (COD)	0,99088
Adj. R-Square	0,99087

Allegato 2 Dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle analisi di best – fitting degli estensimetri della parete downstream della PH



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
у0	33,78574 ± 0,72876
A1	-21,5245 ± 0,71389
t1	246,70948 ± 10,6335
Reduced Chi-Sqr	0,13263
R-Square (COD)	0,97816
Adj. R-Square	0,97814

General model Power2:			
f(x) = a	*x^b+c		
Coefficien	ts (with 95% confidence bounds):		
a =	0.1211 (0.1113, 0.1309)		
b =	0.8862 (0.8702, 0.9022)		
c =	12.27 (12.21, 12.33)		
Goodness of fit:			
SSE: 438.3			
R-square: 0.9753			
Adjusted R-square: 0.9753			
RMSE: 0.3875			

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y 0	23,67566 ± 0,04395
A1	-11,72986 ± 0,03616
t1	104,71654 ± 0,89648
Reduced Chi-Sqr	0,1418
R-Square (COD)	0,98237
Adj. R-Square	0,98237

Fitting 25/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
уO	23,44801 ± 0,06005
A1	-11,53735 ± 0,05007
t1	100,93191 ± 1,11822
Reduced Chi-Sqr	0,15715
R-Square (COD)	0,97846
Adj. R-Square	0,97845

General model Power2:		
$f(x) = a^*x^b+c$		
Coefficients (with 95% confidence bounds):		
a = 0.5782 (0.5343, 0.6221)		
b = 0.5656 (0.5526, 0.5786)		
c = 11.11 (10.99, 11.24)		
Goodness of fit:		
SSE: 1129		
R-square: 0.9616		
Adjusted R-square: 0.9616		
RMSE: 0.5289		
R-square: 0.9616 Adjusted R-square: 0.9616 RMSE: 0.5289		

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	24,49198 ± 0,03861
A1	-12,41244 ± 0,03176
t1	119,12153 ± 0,86092
Reduced Chi-Sqr	0,13891
R-Square (COD)	0,98484
Adj. R-Square	0,98484

General model Power2: f(x) = a*x^b+c	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a = 0.7337 (0.6858, 0.7817)	
b = 0.5209 (0.5101, 0.5316)	
c = 10.82 (10.7, 10.95)	
Goodness of fit:	
SSE: 1216	
R-square: 0.9673	
Adjusted R-square: 0.9673	
RMSE: 0.5131	

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^{\wedge}c$
Plot	B
a	10,63603 ± 0,05893
b	0,8317 ± 0,02303
с	0,49847 ± 0,00439
Reduced Chi-Sqr	0,23437
R-Square (COD)	0,97442
Adj. R-Square	0,97441

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	24,74238 ± 0,03164
A1	-12,61747 ± 0,02605
t1	123,88051 ± 0,7555
Reduced Chi-Sqr	0,12857
R-Square (COD)	0,98688
Adj. R-Square	0,98687



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
уO	15,75296 ± 0,07162
A1	-19,14687 ± 0,16936
t1	47,00715 ± 0,82304
Reduced Chi-Sqr	0,08322
R-Square (COD)	0,97793
Adj. R-Square	0,97791

$ \begin{array}{l} \mbox{General model Power2:} \\ f(x) = a^{x}x^{h}b+c \\ \mbox{Coefficients (with 95% confidence bounds):} \\ a = -91.86 \ (-100.8, -82.97) \\ b = -0.4458 \ (-0.4951, -0.3966) \end{array} $
c = 2525(2372679)
Goodness of fit: SSE: 163.9
R-square: 0.9763
Adjusted R-square: 0.9763
RMSE: 0.2988

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	15,75673 ± 0,01903
A1	-17,97063 ± 0,11138
t1	49,74987 ± 0,37653
Reduced Chi-Sqr	0,10272
R-Square (COD)	0,9783
Adj. R-Square	0,97829

Fitting 25/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^* exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	15,12016 ± 0,01549
A1	-20,41251 ± 0,13119
t1	40,59789 ± 0,26416
Reduced Chi-Sqr	0,05901
R-Square (COD)	0,98609
Adj. R-Square	0,98608

General model Power2: f(x) = a*x^b+c			
Coefficients (with 95% confidence bounds):			
a = -334.4 (-361.7, -307.1)			
b = -0.9421 (-0.9672, -0.917)			
c = 17.65 (17.51, 17.79)			
Goodness of fit:			
SSE: 221.7			
R-square: 0.9822			
Adjusted R-square: 0.9822			
RMSE: 0.2746			

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	17,30109 ± 0,03625
A1	-15,30335 ± 0,07238
t1	76,84515 ± 0,81679
Reduced Chi-Sqr	0,20421
R-Square (COD)	0,96486
Adj. R-Square	0,96484

General model Power2:		
f(x) =	a*x^b+c	
Coefficien	nts (with 95% confidence bounds)	
a =	-186.5 (-198.8, -174.2)	
b =	-0.7492 (-0.7705, -0.7278)	
C =	19.2 (19.01, 19.38)	
Goodness	s of fit:	
SSE: 315		
R-square: 0.9811		
Adjusted	d R-square: 0.9811	
RMSE: 0	.2992	

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^c$
Plot	В
a	-149,44628 ± 65,728
b	141,20918 ± 65,1418
С	0,03033 ± 0,01226
Reduced Chi-Sq	0,19016
R-Square (COD)	0,96728
Adj. R-Square	0,96726

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	18,35885 ± 0,04292
A1	-14,87289 ± 0,04928
t1	98,00136 ± 1,04796
Reduced Chi-Sqr	0,21858
R-Square (COD)	0,96672
Adj. R-Square	0,96671

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^{\Lambda}c$
Plot	В
а	-182,5053 ± 74,4549
b	173,83569 ± 73,9674
С	0,02544 ± 0,00967
Reduced Chi-Sq	0,16953
R-Square (COD)	0,97419
Adj. R-Square	0,97418



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^*exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	22,88546 ± 0,03176
A1	-7,41944 ± 0,02685
t1	77,90552 ± 0,67473
Reduced Chi-Sqr	0,02263
R-Square (COD)	0,99192
Adj. R-Square	0,99192

General model Power2: f(x) = a*x^b+c	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a = 0.5685 (0.5456, 0.5913)	
b = 0.5203 (0.5131, 0.5274)	
c = 14.58 (14.53, 14.63)	
Goodness of fit:	
SSE: 75.32	
R-square: 0.9908	
Adjusted R-square: 0.9908	
RMSE: 0.1606	

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	22,84934 ± 0,01008
A1	-7,35491 ± 0,009
t1	78,36214 ± 0,30331
Reduced Chi-Sqr	0,02027
R-Square (COD)	0,99423
Adj. R-Square	0,99423

Fitting 25/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
у0	22,64875 ± 0,01228
A1	-7,20715 ± 0,01045
t1	73,73241 ± 0,33271
Reduced Chi-Sqr	0,01979
R-Square (COD)	0,99396
Adj. R-Square	0,99396

General model Power2:	
$f(x) = a*x^b+c$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a = 1.173 (1.125, 1.221)	
b = 0.3861 (0.3798, 0.3924)	
c = 13.68 (13.6, 13.76)	
Goodness of fit:	
SSE: 173.7	
R-square: 0.9868	
Adjusted R-square: 0.9868	
RMSE: 0.2078	

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	23,19097 ± 0,00963
A1	-7,59393 ± 0,00895
t1	87,09096 ± 0,32349
Reduced Chi-Sqr	0,02507
R-Square (COD)	0,99343
Adj. R-Square	0,99343

General m	nodel Power2:
f(x) = a	*x^b+c
Coefficien	ts (with 95% confidence bounds)
a =	1.414 (1.361, 1.467)
b =	0.3548 (0.3493, 0.3603)
C =	13.35 (13.27, 13.44)
Goodness	of fit:
SSE: 200.	3
R-square	: 0.9876
Adjusted	R-square: 0.9876
RMSE: 0.	2085
a = b = c = Goodness SSE: 200. R-square Adjusted RMSE: 0.	Is (with 95% confidence bounds 1.414 (1.361, 1.467) 0.3548 (0.3493, 0.3603) 13.35 (13.27, 13.44) of fit: 3 : 0.9876 R-square: 0.9876 2085

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^*c$
Plot	В
a	13,0711 ± 0,04382
b	1,62421 ± 0,02733
с	0,33268 ± 0,00236
Reduced Chi-Sqr	0,04081
R-Square (COD)	0,98931
Adj. R-Square	0,9893

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y$
Plot	В
y0	23,3864 ± 0,00896
A1	-7,72544 ± 0,00866
t1	92,5437 ± 0,32564
Reduced Chi-Sqr	0,0274
R-Square (COD)	0,99315
Adj. R-Square	0,99315

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	В
a	12,82224 ± 0,04484
b	1,81229 ± 0,02862
с	0,31589 ± 0,00214
Reduced Chi-Sqr	0,04035
R-Square (COD)	0,98991
Adj. R-Square	0,98991



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	7,41156 ± 0,01972
A1	-5,9974 ± 0,03191
t1	49,72011 ± 0,67315
Reduced Chi-Sqr	0,00469
R-Square (COD)	0,98853
Adj. R-Square	0,98852

General model Power2:		
$f(x) = a^*x^b+c$		
Coefficients (with 95% confidence bounds):		
a = 0.7968 (0.7323, 0.8613)		
b = 0.4618 (0.4477, 0.4759)		
c = 0.09569 (-0.02538, 0.2168)		
Goodness of fit:		
SSE: 217.9		
R-square: 0.9663		
Adjusted R-square: 0.9662		
RMSE: 0.29		

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^* exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
уO	7,33441 ± 0,00583
A1	-5,6686 ± 0,0298
t1	50,52105 ± 0,34833
Reduced Chi-Sqr	0,00905
R-Square (COD)	0,98252
Adj. R-Square	0,98251

Fitting 25/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp}(-x/t1) + y0$
Plot	В
уО	7,1306 ± 0,00496
A1	-6,31219 ± 0,03473
t1	41,65417 ± 0,25402
Reduced Chi-Sqr	0,00537
R-Square (COD)	0,98844
Adj. R-Square	0,98843

General model Power2:	
$f(x) = a*x^b+c$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a = -74.3 (-79.45, -69.15)	
b = -0.832 (-0.8544, -0.8097)	
c = 8.135 (8.081, 8.188)	
Goodness of fit:	
SSE: 20.01	
R-square: 0.9852	
Adjusted R-square: 0.9852	
RMSE: 0.08295	

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	B
y0	7,94668 ± 0,01415
A1	-4,88985 ± 0,01973
t1	83,3466 ± 0,95311
Reduced Chi-Sqr	0,02294
R-Square (COD)	0,9648
Adj. R-Square	0,96478
General r	nodel Power2:
-----------	-----------------------------------
f(x) =	a*x^b+c
Coefficie	nts (with 95% confidence bounds):
a =	-47.91 (-50.5, -45.32)
b =	-0.6785 (-0.6969, -0.66)
C =	8.63 (8.567, 8.694)
Goodnes	s of fit:
SSE: 26.	96
R-squar	e: 0.9852
Adjuste	d R-square: 0.9851
RMSE: 0	.0877

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^{\wedge}c$
Plot	В
а	-38,78408 ± 14,277
b	38,31477 ± 14,1038
с	0,03593 ± 0,01134
Reduced Chi-Sq	0,01893
R-Square (COD	0,97095
Adj. R-Square	0,97094

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1 \exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	8,47201 ± 0,02003
A1	-4,89386 ± 0,01347
t1	115,19479 ± 1,44109
Reduced Chi-Sqr	0,02597
R-Square (COD)	0,96578
Adj. R-Square	0,96577

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	В
а	-27,76473 ± 6,54407
b	27,33695 ± 6,3999
с	0,0486 ± 0,00927
Reduced Chi-Sqr	0,01857
R-Square (COD)	0,97553
Adj. R-Square	0,97552



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
уO	21,16032 ± 0,02445
A1	-2,3816 ± 0,02133
t1	89,93105 ± 1,71813
Reduced Chi-Sqr	0,0078
R-Square (COD)	0,97032
Adj. R-Square	0,9703

General model Power2:	
$f(x) = a*x^b+c$	
Coefficients (with 95% confidence	e bounds):
a = 0.1654 (0.1545, 0.176	3)
b = 0.5281 (0.5163, 0.539	9)
c = 18.49 (18.46, 18.51)	
Goodness of fit:	
SSE: 18.63	
R-square: 0.9757	
Adjusted R-square: 0.9757	
RMSE: 0.07989	

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1 \exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	21,16958 ± 0,00769
A1	-2,37208 ± 0,00637
t1	92,95418 ± 0,74979
Reduced Chi-Sqr	0,00666
R-Square (COD)	0,98094
Adj. R-Square	0,98094

Fitting 23/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	21,03826 ± 0,00899
A1	-2,26857 ± 0,00741
t1	82,76235 ± 0,79284
Reduced Chi-Sqr	0,00685
R-Square (COD)	0,97817
Adj. R-Square	0,97815



Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	B
yO	21,21582 ± 0,00562
A1	-2,40786 ± 0,00484
t1	96,79752 ± 0,61078
Reduced Chi-Sqr	0,00606
R-Square (COD)	0,98391
Adj. R-Square	0,98391

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	В
а	18,08901 ± 0,01553
b	0,4301 ± 0,00911
с	0,35666 ± 0,00304
Reduced Chi-Sqr	0,00632
R-Square (COD)	0,98324
Adj. R-Square	0,98323

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
yO	21,19024 ± 0,00418
A1	-2,38972 ± 0,00395
t1	94,4672 ± 0,49306
Reduced Chi-Sqr	0,00559
R-Square (COD)	0,98544
Adj. R-Square	0,98544

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^*c$
Plot	В
а	17,90286 ± 0,01947
b	0,56728 ± 0,01249
с	0,31392 ± 0,00298
Reduced Chi-Sqr	0,00747
R-Square (COD)	0,98055
Adj. R-Square	0,98054



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	23,03331 ± 0,00788
A1	-2,57246 ± 0,00685
t1	49,12752 ± 0,42796
Reduced Chi-Sqr	0,00697
R-Square (COD)	0,98274
Adj. R-Square	0,98273

General model Power2:		
$f(x) = a*x^b+c$		
Coefficients (with 95% confidence bounds):		
a = 0.7136 (0.6676, 0.7596)		
b = 0.3258 (0.3161, 0.3356)		
c = 19.51 (19.44, 19.57)		
Goodness of fit:		
SSE: 25.18		
R-square: 0.9784		
Adjusted R-square: 0.9783		
RMSE: 0.09348		

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	23,86653 ± 0,01513
A1	-3,12713 ± 0,01223
t1	98,45163 ± 1,15011
Reduced Chi-Sqr	0,0206
R-Square (COD)	0,96437
Adj. R-Square	0,96436

Fitting 24/03/2021

ExpDec1
y = A1*exp(-x/t1) + y0
В
23,38618 ± 0,00966
-2,7847 ± 0,00848
68,50928 ± 0,67864
0,01539
0,96853
0,96851



Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	24,38789 ± 0,01886
A1	-3,54327 ± 0,01547
t1	134,39337 ± 1,55014
Reduced Chi-Sqr	0,02144
R-Square (COD)	0,96866
Adj. R-Square	0,96865

General r	nodel Power2:
f(x) =	a*x^b+c
Coefficie	nts (with 95% confidence bounds)
a =	0.5415 (0.5123, 0.5708)
b =	0.3668 (0.3588, 0.3747)
C =	19.76 (19.71, 19.81)
Goodnes	s of fit:
SSE: 59.	89
R-squar	e: 0.9779
Adjuster	d R-square: 0.9779
RMSE: 0	.1131

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	В
а	19,94787 ± 0,01958
b	0,42007 ± 0,00986
с	0,40766 ± 0,00349
Reduced Chi-Sqr	0,01221
R-Square (COD)	0,98215
Adj. R-Square	0,98215

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	24,56011 ± 0,01712
A1	-3,68631 ± 0,01403
t1	147,05616 ± 1,48791
Reduced Chi-Sqr	0,02009
R-Square (COD)	0,97301
Adj. R-Square	0,973

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^*c$
Plot	В
а	19,95299 ± 0,01773
b	0,41689 ± 0,00868
с	0,40892 ± 0,00306
Reduced Chi-Sqr	0,01125
R-Square (COD)	0,9849
Adj. R-Square	0,98489

Allegato 3 Dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle analisi di best – fitting dei tiranti della parete upstream della PH



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	823,99901 ± 0,23972
A1	-67,9314 ± 0,21997
t1	88,76409 ± 0,5095
Reduced Chi-Sqr	0,20051
R-Square (COD)	0,99874
Adj. R-Square	0,99874

General model Power2:	
$f(x) = a*x^b+c$	
Coefficients (with 95% confidence bou	nds):
a = 2.131 (2.064, 2.199)	
b = 0.6858 (0.6794, 0.6921)	
c = 753.6 (753.4, 753.8)	
Goodness of fit:	
SSE: 1423	
R-square: 0.9959	
Adjusted R-square: 0.9959	
RMSE: 0.8042	

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
у0	817,19195 ± 0,05089
A1	-61,78917 ± 0,0429
t1	74,51087 ± 0,15846
Reduced Chi-Sqr	0,29765
R-Square (COD)	0,99876
Adj. R-Square	0,99876

Fitting 22/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
yO	817,67409 ± 0,08623
A1	-62,19856 ± 0,07134
t1	75,59937 ± 0,23261
Reduced Chi-Sqr	0,32855
R-Square (COD)	0,99849
Adj. R-Square	0,99849

General model Power2
$f(x) = a^*x^b+c$
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 5.084 (4.876, 5.292)
b = 0.506 (0.4989, 0.5131)
c = 748.2 (747.8, 748.7)
Goodness of fit:
SSE: 7300
R-square: 0.9895
Adjusted R-square: 0.9895
RMSE: 1.509

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	817,86201 ± 0,03608
A1	-62,27793 ± 0,03333
t1	76,32912 ± 0,12919
Reduced Chi-Sqr	0,3001
R-Square (COD)	0,99884
Adj. R-Square	0,99884

General n	nodel Power2:
f(x) = a	a*x^b+c
Coefficier	nts (with 95% confidence bounds):
a =	7.85 (7.516, 8.183)
b =	0.425 (0.4182, 0.4317)
C =	744 (743.4, 744.6)
Goodness	of fit:
SSE: 1.24	9e+04
R-square	e: 0.9864
Adjusted	R-square: 0.9864
RMSE 1	805

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^{\wedge}c$
Plot	В
а	739,40008 ± 0,40263
b	11,12992 ± 0,23856
с	0,36469 ± 0,00317
Reduced Chi-Sqr	3,94001
R-Square (COD)	0,98474
Adj. R-Square	0,98474

Model	ExpDec1
Equation	y = A1 * exp(-x/t1) + y0
Plot	B
y0	818,71103 ± 0,03315
A1	-62,85751 ± 0,03321
t1	78,81542 ± 0,12982
Reduced Chi-Sqr	0,36567
R-Square (COD)	0,99864
Adj. R-Square	0,99864

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	В
а	736,07224 ± 0,45609
b	13,63222 ± 0,28655
С	0,33191 ± 0,00295
Reduced Chi-Sqr	4,26556
R-Square (COD)	0,98411
Adj. R-Square	0,9841



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp}(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	795,04027 ± 1,49503
A1	-326,0865 ± 1,31979
t1	95,33253 ± 0,78792
Reduced Chi-Sqr	23,25586
R-Square (COD)	0,99492
Adj. R-Square	0,99492

General n	nodel Power2:
f(x) = i	a*x^b+c
Coefficier	nts (with 95% confidence bounds):
a =	15.44 (14.89, 15.99)
b =	0.5925 (0.586, 0.5991)
C =	444 (442.5, 445.5)
Goodness	s of fit:
SSE: 9.02	22e+04
R-square	e: 0.9933
Adjusted	d R-square: 0.9933
RMSE: 5	553

Fitting 23/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	742,95391 ± 0,51354
A1	-281,02063 ± 0,44136
t1	69,8187 ± 0,34507
Reduced Chi-Sqr	36,85139
R-Square (COD)	0,99272
Adj. R-Square	0,99272



Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) +
Plot	B
y0	920,2665 ± 322,91
A1	-392,56263 ± 320,
t1	1835,32956 ± 170
Reduced Chi	0,55232
R-Square (C	0,96698
Adi, R-Squar	0,96694

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^{c}$
Plot	В
a	560,27986 ± 0,38092
b	7,79945E-8 ± 4,88216E-8
с	3,48402 ± 0,10957
Reduced Chi-Sqr	0,48475
R-Square (COD)	0,97102
Adj. R-Square	0,97099



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1	
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$	
Plot	В	
y0	919,14159 ± 1,44368	
A1	-399,32907 ± 1,29053	
t1	100,8012 ± 0,63602	
Reduced Chi-Sqr	16,92646	
R-Square (COD)	0,99738	
Adj. R-Square	0,99737	
General model Power2:		
$f(x) = a^*x^b+c$		
Coefficients (with 95% confidence bounds):		
- 15 01 (14 70 15 7)		

a =	15.21	(14.73, 15.7)
b =	0.6281	(0.6222, 0.634)

c = 496.5 (495.1, 497.9)

Goodness of fit: SSE: 9.518e+04 R-square: 0.9949 Adjusted R-square: 0.9949 RMSE: 5.723

Fitting 24/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	866,38555 ± 0,53284
A1	-352,73665 ± 0,4403
t1	78,91983 ± 0,29424
Reduced Chi-Sqr	26,11158
R-Square (COD)	0,99656
Adj. R-Square	0,99656



Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y$
Plot	B
y0	699,66689 ± 0,29763
A1	-343,09209 ± 3,3941
t1	97,71678 ± 0,79305
Reduced Chi-Sqr	0,08302
R-Square (COD)	0,99887
Adj. R-Square	0,99887



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
у0	365,6202 ± 0,48126
A1	-313,27419 ± 3,11775
t1	34,27549 ± 0,3741
Reduced Chi-Sqr	1,79062
R-Square (COD)	0,99511
Adj. R-Square	0,9951

General model Power2:	
$f(x) = a^*x^b+c$	
Coefficients (with 95% confidence bounds)	
a = -3703 (-4198, -3208)	
b = -0.8646 (-0.909, -0.8201)	
c = 418.8 (413.6, 423.9)	
Goodness of fit SSE: 2718 R-square: 0.9938 Adjusted R-square: 0.9937 RMSE: 1.512	

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	375,08547 ± 0,12579
A1	-252,35612 ± 1,1118
t1	44,12292 ± 0,19302
Reduced Chi-Sqr	3,1838
R-Square (COD)	0,99478
Adj. R-Square	0,99478

Fitting 24/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	368,83904 ± 0,12259
A1	-288,29635 ± 1,29213
t1	37,42185 ± 0,15018
Reduced Chi-Sqr	1,6493
R-Square (COD)	0,99691
Adj. R-Square	0,99691

General model Power2:	
$f(x) = a^*x^b+c$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a = -7602 (-7992, -7213)	
b = -1.099 (-1.114, -1.084)	
c = 396.3 (395.4, 397.1)	
Goodness of fit:	
SSE: 3349	
R-square: 0.997	
Adjusted R-square: 0.997	
RMSE: 1.266	

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	B
y0	378,59798 ± 0,07151
A1	-230,89603 ± 0,75931
t1	49,32585 ± 0,14641
Reduced Chi-Sqr	4,00819
R-Square (COD)	0,99409
Adj. R-Square	0,99408

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	381,06564 ± 0,07018
A1	-218,35279 ± 0,78269
t1	53,31923 ± 0,17026
Reduced Chi-Sqr	6,31665
R-Square (COD)	0,99111
Adj. R-Square	0,9911



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
у0	427,61223 ± 0,27522
A1	-87,64795 ± 0,23097
t1	53,0563 ± 0,43975
Reduced Chi-Sqr	6,79825
R-Square (COD)	0,98606
Adj. R-Square	0,98605

General n f(x) = i	nodel Po	wer2:
Coefficier	ts (with	95% confidence bounds):
a =	25.08	(24.21, 25.95)
b =	0.317	(0.3112, 0.3229)
c =	305.6	(304.5, 306.7)
Goodness SSE: 201 R-square Adjusted RMSE: 1	of fit: 7 2: 0.9954 1 R-squar 179	re: 0.9954

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	440,57258 ± 0,15976
A1	-96,9622 ± 0,15044
t1	72,7478 ± 0,35552
Reduced Chi-Sqr	6,2148
R-Square (COD)	0,99008
Adj. R-Square	0,99008

Fitting 22/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A 1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
у0	437,90127 ± 0,20897
A1	-95,12272 ± 0,1823
t1	68,17229 ± 0,41405
Reduced Chi-Sqr	6,71853
R-Square (COD)	0,98856
Adj. R-Square	0,98856

General r	nodel Power2:
f(x) =	a*x^b+c
Coefficie	nts (with 95% confidence bounds):
a =	22.7 (22.33, 23.08)
b =	0.3346 (0.3321, 0.3371)
c =	308.4 (307.9, 308.9)
Goodnes	s of fit:
SSE: 245	52
R-squar	e: 0.9983
Adjuste	d R-square: 0.9983
RMSE: 0	.9157

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	B
yO	441,86084 ± 0,11485
A1	-97,77903 ± 0,12497
t1	75,17943 ± 0,28964
Reduced Chi-Sqr	5,52449
R-Square (COD)	0,99152
Adj. R-Square	0,99152

General model Power2:		
f(x) = a	a*x^b+c	
Coefficier	nts (with	95% confidence bounds):
a =	31.99	(31.41, 32.57)
b =	0.281	(0.2785, 0.2834)
c =	296.9	(296.1, 297.7)
Goodness	of fit:	
SSE: 8204		
R-square: 0.9971		
Adjusted R-square: 0.9971		
RMSE 1 341		

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^{n}c$
Plot	В
a	284,46686 ± 0,68294
b	42,47494 ± 0,52438
С	0,24081 ± 0,00152
Reduced Chi-Sqr	3,55641
R-Square (COD)	0,99454
Adj. R-Square	0,99454

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	442,61347 ± 0,09399
A1	-98,21158 ± 0,11441
t1	76,72035 ± 0,2572
Reduced Chi-Sor	5,15049
R-Square (COD)	0,99221
Adj. R-Square	0,99221

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^*c$
Plot	В
а	273,78532 ± 0,91808
b	51,79521 ± 0,73374
c	0,21483 ± 0,00163
Reduced Chi-Sqr	4,88262
R-Square (COD)	0,99261
Adi, R-Square	0,99261



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	804,44964 ± 1,41234
A1	-301,28824 ± 1,19149
t1	77,57739 ± 0,73895
Reduced Chi-Sqr	45,96239
R-Square (COD)	0,99016
Adj. R-Square	0,99016

General model Power2:	
$f(x) = a*x^b+c$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a = 21.63 (20.52, 22.74)	
b = 0.5319 (0.5227, 0.5411)	
c = 470.7 (468.2, 473.2)	
Goodness of fit:	
SSE: 2.017e+05	
R-square: 0.9853	
Adjusted R-square: 0.9853	
RMSE: 8.292	

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	759,0457 ± 0,32124
A1	-265,32641 ± 0,42931
t1	55,72335 ± 0,2488
Reduced Chi-Sqr	55,57017
R-Square (COD)	0,98835
Adi, R-Square	0,98834

Fitting 25/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	764,29234 ± 0,46877
A1	-268,68334 ± 0,47514
t1	58,53601 ± 0,3219
Reduced Chi-Sqr	58,09953
R-Square (COD)	0,98801
Adj. R-Square	0,98801

General model Power2:	
$f(x) = a^*x^b+c$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a = 71.71 (66.78, 76.65)	
b = 0.3152 (0.3053, 0.325)	
c = 401.5 (394.3, 408.7)	
Goodness of fit:	
SSE: 7.069e+05	
R-square: 0.9635	
Adjusted R-square: 0.9635	
RMSE: 13.29	

Model	ExpDec1
Equation	y = A1 * exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	756,60209 ± 0,22487
A1	-264,00141 ± 0,39872
t1	54,31979 ± 0,19751
Reduced Chi-Sqr	49,81407
R-Square (COD)	0,98919
Adj. R-Square	0,98918

General model Power2: $f(x) = a^*x^b+c$ Coefficients (with 95% confidence bounds): a = 118.7 (109.7, 127.8) b = 0.2393 (0.2298, 0.2488) c = 346.8 (335.2, 358.3) Goodness of fit: SSE: 1.014e+06 R-square: 0.9534 Adjusted R-square: 0.9534 RMSE: 14.9

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	B
v0	756,35345 ± 0,1837
A1	-263,88526 ± 0,37961
t1	54,16903 ± 0,17443
Reduced Chi-Sqr	45,61509
R-Square (COD)	0,98983
Adj. R-Square	0,98982

Allegato 4 Dati di monitoraggio scaricati ed i parametri dati delle analisi di best – fitting dei tiranti della parete downstream della PH



Fitting 01/02/2021

exp(-x/t1) + y0 B 339 ± 0,24106 355 ± 0,2004
B 39 ± 0,24106 955 ± 0,2004
39 ± 0,24106
955 ± 0.2004
595 ± 0,4935
1,75405
),98419
),98418

General model Power2:		
$f(x) = a^*x^b+c$		
Coefficients (with 95% confidence bounds):		
a = 18.17 (17.89, 18.44)		
b = 0.3315 (0.3291, 0.3338)		
c = 212.2 (211.8, 212.6)		
Goodness of fit:		
SSE: 1310		
R-square: 0.9985		
Adjusted R-square: 0.9985		
RMSE: 0.6681		

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec 1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	315,66954 ± 0,12508
A1	-75,35992 ± 0,11931
t1	71,78457 ± 0,35719
Reduced Chi-Sqr	3,97534
R-Square (COD)	0,98953
Adj. R-Square	0,98952

Fitting 25/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	313,75105 ± 0,15682
A1	-74,05587 ± 0,13918
t1	67,56114 ± 0,40331
Reduced Chi-Sqr	4,18326
R-Square (COD)	0,98834
Adj. R-Square	0,98833

General model Power2:	
$f(x) = a*x^b+c$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a = 22.52 (22.17, 22.86)	
b = 0.2971 (0.295, 0.2993)	
c = 206.8 (206.3, 207.3)	
Goodness of fit: SSE: 2726 R-square: 0.9981 Adjusted R-square: 0.9981 RMSE: 0.8241	

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	B
y0	317,19878 ± 0,09501
A1	-76,30217 ± 0,10296
t1	75,5468 ± 0,30755
Reduced Chi-Sqr	3,74794
R-Square (COD)	0,99056
Adj. R-Square	0,99056

General model Power2:		
$f(x) = a^*x^b+c$		
Coefficients (with 95% confidence bounds):		
a = 26.69 (26.2, 27.18)		
b = 0.2717 (0.2693, 0.2741)		
c = 201.8 (201.1, 202.4)		
Goodness of fit:		
SSE: 5067		
R-square: 0.9971		
Adjusted R-square: 0.9971		
RMSE: 1.054		

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^{c}$
Plot	В
a	193,05405 ± 0,50472
b	34,08889 ± 0,39013
с	0,23739 ± 0,00139
Reduced Chi-Sqr	1,86035
R-Square (COD)	0,99532
Adj. R-Square	0,99531

Model	ExpDoc1
woder	ExpDeci
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
yO	318,84075 ± 0,08654
A1	-77,25898 ± 0,09968
t1	79,89847 ± 0,30365
Reduced Chi-Sqr	3,91601
R-Square (COD)	0,99045
Adj. R-Square	0,99045

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	В
a	188,62011 ± 0,54742
b	37,93543 ± 0,43027
с	0,22334 ± 0,00133
Reduced Chi-Sqr	1,98198
R-Square (COD)	0,99517
Adj. R-Square	0,99517



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	225,87265 ± 0,05371
A1	-18,25751 ± 0,0478
t1	48,06289 ± 0,40423
Reduced Chi-Sqr	0,3674
R-Square (COD)	0,98321
Adj. R-Square	0,9832

General model Power2:	
$f(x) = a^{*}x^{b+c}$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a = 4.313 (4.068, 4.558)	
b = 0.3499 (0.341, 0.3588)	
c = 202.1 (201.7, 202.4)	
Goodness of fit:	
SSE: 1290	
R-square: 0.9799	
Adjusted R-square: 0.9799	
RMSE: 0.6629	

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1 \exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
у0	239,17406 ± 0,27835
A1	-28,99993 ± 0,24598
t1	153,02642 ± 2,64833
Reduced Chi-Sqr	1,34041
R-Square (COD)	0,96446
Adj. R-Square	0,96444

Fitting 25/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
у0	231,53964 ± 0,11269
A1	-22,4465 ± 0,09269
t1	88,8603 ± 1,02615
Reduced Chi-Sqr	0,83528
R-Square (COD)	0,97215
Adj. R-Square	0,97214

General model Power2:		
$f(x) = a*x^b+c$		
Coefficients (with 95% confidence bounds):		
a = 3.025 (2.884, 3.165)		
b = 0.411 (0.4037, 0.4183)		
c = 203.8 (203.6, 204.1)		
Goodness of fit:		
SSE: 1993		
R-square: 0.9834		
Adjusted R-square: 0.9834		
RMSE: 0.7052		

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{ex}p(-x/t1) + y0$
Plot	B
yO	256,7957 ± 0,79219
A1	-45,6871 ± 0,75654
t1	309,656 ± 7,68237
Reduced Chi-Sqr	1,52416
R-Square (COD)	0,96996
Adj. R-Square	0,96995

General model Power2:		
$f(x) = a*x^b+c$		
Coefficients (with 95% confidence bounds):		
a = 1.787 (1.692, 1.882)		
b = 0.5028 (0.4941, 0.5115)		
c = 205.9 (205.7, 206.2)		
Goodness of fit:		
SSE: 3793		
R-square: 0.9779		
Adjusted R-square: 0.9779		
RMSE: 0.9136		

Model	Allom etric2
Equation	$y = a + b^*x^{h}c$
Plot	В
а	208,00521 ± 0,09375
b	0,88897 ± 0,02406
С	0,62715 ± 0,00451
Reduced Chi-Sqr	1,07325
R-Square (COD)	0,97885
Adj. R-Square	0,97884

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1 \exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	258,23859 ± 0,64586
A1	-47,08745 ± 0,61342
t1	322,76464 ± 6,46772
Reduced Chi-Sqr	1,39797
R-Square (COD)	0,97601
Adj. R-Square	0,976

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	В
а	208,14766 ± 0,08414
b	0,84139 ± 0,01993
с	0,63696 ± 0,00389
Reduced Chi-Sqr	0,99076
R-Square (COD)	0,983
Adj. R-Square	0,98299

Allegato 5 Dati di monitoraggio scaricati ed i parametri delle analisi di best – fitting dei tiranti delle pareti nord e sud della PH



Fitting 17/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
у0	869,23248 ± 0,16551
A1	-92,25067 ± 0,15361
t1	111,9105 ± 0,31585
Reduced Chi-Sqr	0,08307
R-Square (COD)	0,99969
Adj. R-Square	0,99969

General model Power2:	
$f(x) = a^x x^b + c$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a = 2.343 (2.289, 2.396)	
b = 0.6979 (0.6934, 0.7024)	
c = 773.8 (773.7, 774)	
Goodness of fit: SSE: 1601 R-square: 0.9977 Adjusted R-square: 0.9977 RMSE: 0.79	

Fitting 21/04/2021

Fitting 19/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1 \exp(-x/t1) + y$
Plot	В
y0	864,0799 ± 0,10396
A1	-87,40202 ± 0,09131
t1	102,69384 ± 0,2235
Reduced Chi-Sqr	0,14343
R-Square (COD)	0,99957
Adj. R-Square	0,99957

General model Power2:		
$f(x) = a^{x}h^{b+c}$		
Coefficients (with 95% confidence bounds)):	
a = 3.645 (3.542, 3.747)		
b = 0.6063 (0.6012, 0.6114)		
c = 771 (770.7, 771.3)		
Goodness of fit:		
SSE: 4767		
R-square: 0.9955		
Adjusted R-square: 0.9955		
RMSE: 1.227		

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
у0	859,99526 ± 0,07108
A1	-83,76947 ± 0,05896
t1	94,62291 ± 0,17573
Reduced Chi-Sqr	0,2517
R-Square (COD)	0,99936
Adj. R-Square	0,99936

General model Power2:	
$f(x) = a^*x^b+c$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a = 6.025 (5.816, 6.234)	
b = 0.5091 (0.5033, 0.5149)	
c = 766.5 (766, 767)	
Goodness of fit:	
SSE: 1.282e+04	
R-square: 0.9915	
Adjusted R-square: 0.9915	
RMSE: 1.827	

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	857,59073 ± 0,05064
A1	-81,77468 ± 0,0425
t1	89,47281 ± 0,14356
Reduced Chi-Sqr	0,3499
R-Square (COD)	0,99918
Adj. R-Square	0,99918

Model	Allo metric2
Equation	$y = a + b^*x^*c$
Plot	B
а	760,77669 ± 0,38611
b	9,5625 ± 0,19479
с	0,42579 ± 0,00316
Reduced Chi-Sqr	5,67259
R-Square (COD)	0,98666
Adj. R-Square	0,98665

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^* exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	857,49603 ± 0,0385
A1	-81,69822 ± 0,03425
t1	89,26534 ± 0,11915
Reduced Chi-Sqr	0,3306
R-Square (COD)	0,99925
Adj. R-Square	0,99925

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^{\Lambda}c$
Plot	B
а	756,67878 ± 0,46632
b	12,33387 ± 0,25717
С	0,38268 ± 0,00308
Reduced Chi-Sqr	6,79665
R-Square (COD)	0,98464
Adj. R-Square	0,98464



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^*exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	829,39758 ± 0,29096
A1	-78,92318 ± 0,25772
t1	95,83687 ± 0,63202
Reduced Chi-Sqr	0,8456
R-Square (COD)	0,9968
Adj. R-Square	0,9968

General model Power2:
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 3.19 (3.067, 3.314)
b = 0.6212 (0.614, 0.6284)
c = 745.8 (745.5, 746.2)
Goodness of fit: SSE: 5885 R-square: 0.9923 Adjusted R-square: 0.9922 RMSE: 1.431

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	818,91934 ± 0,08216
A1	-69,56424 ± 0,07582
t1	75,25369 ± 0,25988
Reduced Chi-Sqr	1,55217
R-Square (COD)	0,99519
Adj. R-Square	0,99519

Fitting 24/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	817,46585 ± 0,1057
A1	-68,49809 ± 0,09071
.t1	71,80565 ± 0,29743
Reduced Chi-Sqr	1,54776
R-Square (COD)	0,99487
Adj. R-Square	0,99487

General model Power2:
$f(x) = a^*x^b + c$
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 9.676 (9.143, 10.21)
b = 0.4083 (0.3996, 0.4169)
c = 735.2 (734.3, 736.2)
Goodness of fit:
SSE: 2.742e+04
R-square: 0.977
Adjusted R-square: 0.9769
RMSE: 2.638

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	B
y0	821,85848 ± 0,07874
A1	-71,59702 ± 0,07687
t1	82,95403 ± 0,28094
Reduced Chi-Sqr	2,01499
R-Square (COD)	0,99422
Adj. R-Square	0,99422

General model Power2:		
f(x) = a	$f(x) = a^{*}x^{b+c}$	
Coefficient	ts (with 95% confidence bounds):	
a =	12.38 (11.76, 13)	
b =	0.366 (0.3586, 0.3734)	
c =	731.5 (730.5, 732.6)	
GOODINESS OF III.		
SSE: 3.155e+04		
R-square: 0.9786		
Adjusted R-square: 0.9786		
RMSE: 2.6	531	

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^{c}$
Plot	В
a	728,51737 ± 0,529
b	14,59938 ± 0,3246
с	0,33926 ± 0,00314
Reduced Chi-S	6,34583
R-Square (COD	0,98179
Adj. R-Square	0,98179

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	823,95148 ± 0,07921
A1	-72,96394 ± 0,07966
t1	89,03022 ± 0,30519
Reduced Chi-Sqr	2,45038
R-Square (COD)	0,99328
Adj. R-Square	0,99328

Model	Allometric2
Equation	y = a + b*x^c
Plot	B
а	726,63247 ± 0,52225
b	16,01433 ± 0,326
с	0,32491 ± 0,00279
Reduced Chi-Sqr	5,97282
R-Square (COD)	0,98363
Adj. R-Square	0,98362



Fitting 01/02/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
у0	796,42908 ± 0,66283
A1	-92,65426 ± 0,61344
t1	124,96774 ± 1,41809
Reduced Chi-Sqr	1,62643
R-Square (COD)	0,9942
Adj. R-Square	0,99419

General model Power2:
$f(x) = a^*x^b+c$
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 2.04 (1.945, 2.134)
b = 0.7099 (0.7011, 0.7187)
c = 701.1 (700.8, 701.5)
Goodness of fit:
SSE: 8161
R-square: 0.9901
Adjusted R-square: 0.9901
RMSE: 1.668

Fitting 21/04/2021

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{exp(-x/t1)} + y0$
Plot	В
y0	783,12241 ± 0,18596
A1	-80,09285 ± 0,15262
t1	99,16239 ± 0,53622
Reduced Chi-Sqr	2,71976
R-Square (COD)	0,99281
Adj. R-Square	0,99281

Fitting 24/03/2021

Model	ExpDec1
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	778,34768 ± 0,19147
A1	-76,10609 ± 0,15748
t1	88,21462 ± 0,50729
Reduced Chi-Sqr	2,28719
R-Square (COD)	0,99318
Adj. R-Square	0,99318

General model Power2:			
$f(x) = a^*x^b+c$			
Coefficients (with 95% confidence bounds):			
a =	5.803 (5.488, 6.119)		
b =	0.5027 (0.4936, 0.5118)		
C =	693.6 (692.8, 694.3)		
Goodness of fit:			
SSE: 2.755e+04			
R-square: 0.9792			
Adjusted R-square: 0.9792			
RMSE: 2.641			
	eral m x) = a ficien a = b = c = dness : 2.75 quare usted SE: 2.6		

Model	ExpDec1
Equation	$y = A1^{*}exp(-x/t1) + y0$
Plot	В
y0	784,81071 ± 0,13748
A1	-81,4832 ± 0,11356
t1	103,27949 ± 0,43856
Reduced Chi-Sqr	2,49028
R-Square (COD)	0,99396
Adj. R-Square	0,99395

General model Power2:		
$f(x) = a^*x^b+c$		
Coefficients (with 95% confidence bounds):		
a = 6.338 (6.047, 6.63)		
b = 0.4865 (0.479, 0.4939)		
c = 692.6 (692, 693.3)		
Goodness of fit:		
SSE: 2.851e+04		
R-square: 0.9834		
Adjusted R-square: 0.9834		
RMSE: 2.505		

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^*c$
Plot	В
a	689,68383 ± 0,36841
b	8,08301 ± 0,17178
С	0,44376 ± 0,00328
Reduced Chi-Sqr	6,41301
R-Square (COD)	0,98444
Adj. R-Square	0,98443

Model	ExpDec1
Equation	y = A1 * exp(-x/t1) + y0
Plot	В
y0	784,62871 ± 0,10639
A1	-81,34273 ± 0,09076
t1	102,79358 ± 0,36429
Reduced Chi-Sqr	2,27591
R-Square (COD)	0,99465
Adj. R-Square	0,99465

Model	Allometric2
Equation	$y = a + b^*x^*c$
Plot	В
a	686,51812 ± 0,42044
b	10,07108 ± 0,21268
с	0,4067 ± 0,00314
Reduced Chi-Sqr	7,14943
R-Square (COD)	0,98319
Adj. R-Square	0,98319

Riferimenti bibliografici

Monica Barbero. "Analysis and design of geotechnical structures and earthworks". Politecnico di Torino. A.A. 2019 / 2020;

Alberto Cina. "Course of Geomatica". Politecnico di Torino. A.A. 2018 / 2019;

M. BARLA. "Course of numerical methods in geotechnical engineering". Politecnico di Torino. A.A. 2020 / 2021;

"Materiale confidenziale Geodata Engineering";

Sulem, J, Panet, M and Guenot, A.(1987a). "Closure analysis in deep tunnels. In: Int J Rock Mech and Min Sci", 24, pp.145-154;

Panet, M. (1995). "Le calcul des tunnels par la methode convergence-confinement". Presses de l'Ecole Nationale des Ponts e Chuassees, Paris;

Ghosh Roy, M. e Rao, K.S. (2015). "Analysis of creep behaviour of soft rocks in tunnelling", pp.1-13;

Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., and Corkum, B. (2002), "Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition". Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto in July 2002;

Hoek E, Diederichs MS. "Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences". 2006, 43, pp.203–215;

Hoek, E., & Brown, E. T. "The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering". 2019, 11;

Lorig L, Varona P (2013). "Guidelines for numerical modelling of rock support for mines, Ground Support". 2013. In: Potvin Y, Brady B (eds) Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp.81-105;

Rapport LTF01 - Février 2006. "Avis sur les conditions de soutenement de la descenderie de St Martin la porte dans les schistes houillers";

Ringraziamenti

In questo periodo storico, a causa di una pandemia, studiare e lavorare per una tesi di Laurea non è stato semplice. Grazie alla mia determinazione, volontà e, soprattutto, alle persone a me care sono riuscito ad ottenere questo importante risultato.

Un ringraziamento alla Professoressa *Monica Barbero* che in questi mesi ha seguito il lavoro da me svolto con passione e professionalità, che mi ha supportato e mi ha aiutato ad affrontare questa esperienza e che mi ha sempre dato degli ottimi consigli. Grazie a lei ho avuto la possibilità di svolgere il tirocinio e la tesi in azienda.

Un ringraziamento ai miei tutor aziendali: *Giovanni Quaglio* e *Giordano Russo*, co-relatori e rappresentanti dello staff di *GEODATA Engineering*, che mi hanno dato l'opportunità di compiere il tirocinio e la tesi in azienda, seguendomi durante il lavoro svolto ed aiutandomi a crescere dal punto di vista professionale.

Un ringraziamento ad *Alessio Locchi, Cristiano Bertello* ed anche a tutte le persone che ho conosciuto durante questi mesi di stages e tesi dell'*Azienda GEODATA Engineering*.

Un ringraziamento speciale a tutti i miei più cari amici e colleghi universitari *Francesco, Federico, Fabrizio, Gabriele, Francesco, Claudio, Roberto, Rosario, Daniele, Manuela, Dario, Stella, Lorenzo, Alexandra, Miriam e Andrea.* In questi anni con un semplice consiglio, con una semplice risata, con un semplice messaggio e con una semplice chiamata avete contribuito al raggiungimento di questo straordinario traguardo.

Infine, i più sinceri ed importanti ringraziamenti alla mia famiglia. A mio padre e mia madre che, solo grazie a loro, sono riuscito a completare il mio percorso di studio al Politecnico di Torino. A mia sorella Simona e Luca per aver creduto sempre in me. Ai miei nonni, esempi di vita. A Lia e Franco, la mia seconda famiglia. A tutti i miei zii, cugini ed amici di famiglia.

Bene, andiamo a prenderci questo bel traguardo eh.

Grazie a tutti. Vi voglio bene!!!

Luca Sebastian Purpura