

# L'INTERFERENZA TRA UNA GALLERIA SCAVATA CON ESPLOSIVO ED UNA GALLERIA OLEODOTTO ESISTENTE

L. Locatelli, E. Ramelli, M. Perolo  
Golder Associates S.r.l., Milano

## SOMMARIO

Per lo scavo di una galleria stradale è stato previsto l'uso di esplosivo; tuttavia, interferendo con una galleria esistente a meno di 10 m di distanza, è stato necessario svolgere uno studio specifico in relazione all'uso particolare della galleria interferita, che contiene numerosi oleodotti, e che costituisce una connessione strategica tra il porto di Genova e i depositi petroliferi della Pianura Padana. Il lavoro parte dall'analisi ad elementi finiti tridimensionali per simulare l'effetto dello scavo. Da una serie di prove di volata si è definita la legge sismica di sito che governa la propagazione delle onde sismiche indotte dall'esplosivo. E' stato quindi proposto un piano di monitoraggio sia delle velocità di vibrazione sia delle deformazioni indotte sulle strutture degli oleodotti e della galleria in tempo reale con allarmi imposti al superamento di soglie prefissate. I limiti introdotti si sono riferiti alla classificazione di strutture sensibili al fine di minimizzare il rischio di disfunzioni o disservizi delle tubazioni quali l'interruzione del flusso di idrocarburi e conseguente blocco dell'approvvigionamento. La soluzione di scavo finale è stata quindi determinata garantendo il rispetto dei limiti imposti, riducendo la quantità di esplosivo fino al suo abbandono e passando all'uso di martellone pesante e perforazioni di alleggerimento. La legge di vibrazione è stata quindi analizzata al fine di poterla applicare in maniera preventiva in altre situazioni che prevedono interferenze di scavi in prossimità di strutture e/o di edifici sensibili.

Parole chiave: gallerie, monitoraggio, vibrazioni, sistema d'allarme, modellazione FEM tridimensionale

## 1 INTRODUZIONE

Lo scavo di gallerie avviene sempre più spesso in ambito urbanizzato e comporta quindi la necessità di dover risolvere con tecniche apposite e consolidate le interferenze con strutture o edifici finalizzate a minimizzare il rischio di qualsiasi danno.

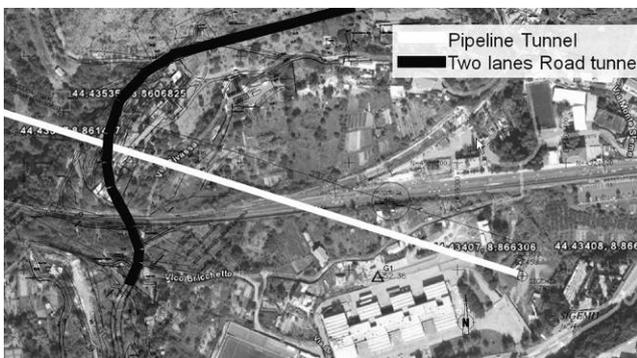


Figura 1. Planimetria interferenza

Il presente studio analizza l'interferenza dello scavo di una galleria stradale a due corsie "Battestu", di 529 m di lunghezza, con l'esistente galleria oleodotto di proprietà della "Sigemi" di 833 m, nel punto più vicino la calotta di quest'ultima dista circa 10 m dalla base dell'arco rovescio della nuova galleria.

La Galleria Battestu è nata per risolvere il traffico pesante connesso alla discarica di Monte Scarpino, della società Azienda Multiservizi di Igiene Urbana ("AMIU"); la galleria Sigemi contiene 12 oleodotti che servono il flusso di idrocarburi dal Porto di Genova verso i depositi petroliferi di Milano.

L'impresa costruttrice è la Coestra di Firenze, mentre la società Geodata svolge la funzione di progettista e Direzione Lavori. La Golder Associates S.r.l. ("Golder") è stata incaricata da Sigemi di valutare e gestire le problematiche indotte dallo scavo, previsto con esplosivo, in modo da non avere ripercussioni sulla funzionalità della galleria Sigemi e di conseguenza sugli oleodotti in essa presenti.

La presente memoria descrive le attività eseguite, le analisi svolte e lo studio delle vibrazioni indotte dal procedere dello scavo rilevate con un sistema di

monitoraggio dedicato.

## 2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA' SVOLTE

La galleria Battestu ha una luce di 12,1 m e un fronte di scavo di 9,15 m d'altezza, attraversa un ammasso composto da microgabbri e/o basalti a granulometria fine, localmente serpentinnizzati. Tale ammasso si rileva piuttosto competente e con limitate fratturazioni. L'uso di esplosivo risulta pertanto il metodo più appropriato per una produzione di scavo in avanzamento accettabile.

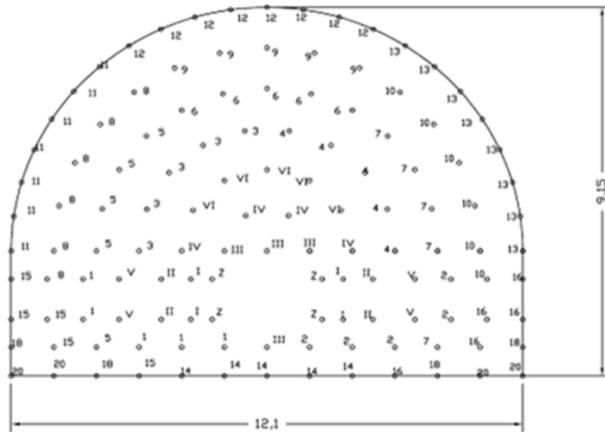


Figura 2: Sezione della galleria Battestu con schema di volata

La galleria Sigemi ha una forma a ferro di cavallo di 2,8 m di luce e 3,0 m di altezza con rivestimento in calcestruzzo al quale sono appesi tramite un castelletto in profilati d'acciaio, una serie di tubazioni di vario diametro.

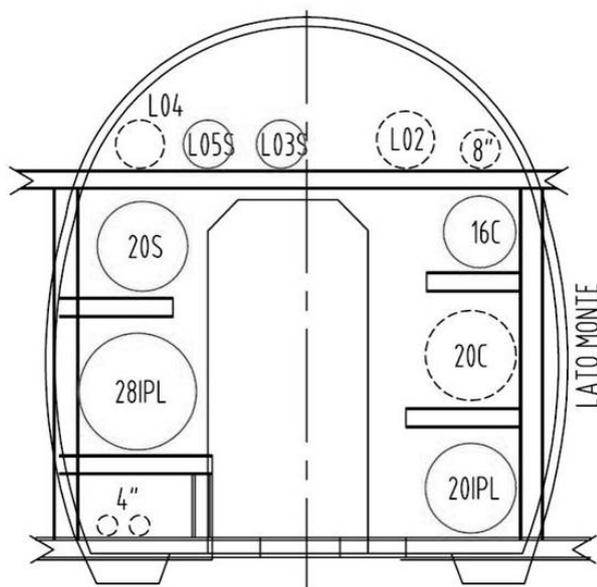


Figura 3 - Sezione dalla galleria oleodotto Sigemi

Per valutare quali siano gli effetti degli scavi interferenti con una galleria esistente è fondamentale individuare, per quest'ultima, le caratteristiche del rivestimento, delle eventuali fessurazioni pregresse, e valutare lo stato tensio-

deformativo nell'intorno della galleria oltre al regime idrogeologico che potrebbe subire delle importanti variazioni dovute al detensionamento dell'ammasso nel contorno. Allo scopo di approfondire tale conoscenza sono state svolte le seguenti attività:

- ispezione di dettaglio della galleria (misure degli spessori, rilievo di eventuali ammaloramenti o vespai);
- esecuzione di prove in sito (prove sclerometriche e pachometriche, carotaggi di calcestruzzo e roccia circostante, doorstopper);
- esecuzione di prove di laboratorio (analisi petrografiche e prove di resistenza monoassiale su roccia e calcestruzzo).

L'esito delle indagini sia di campo che di laboratorio è riassumibile nei seguenti punti:

- la galleria Sigemi è stata costruita negli anni '50. Ha una lunghezza di 833 m, con una pendenza del 5,4 per mille. La galleria è stata presumibilmente scavata mediante esplosivi e senza l'utilizzo di rivestimenti temporanei dello scavo.
- il rivestimento in calcestruzzo ha uno spessore variabile tra 20 e 45 cm e risulta senza alcuna armatura e praticamente "scarico", sottoposto esclusivamente al peso proprio;
- il calcestruzzo presenta caratteristiche di resistenza medio basse con valori di  $R_{ck}=20$  MPa e modulo di elasticità  $E=20$  GPa;
- non sono presenti fessurazioni nel tratto interferito né infiltrazioni d'acqua attraverso il rivestimento. Tuttavia poco dopo il termine delle perforazioni di piccolo diametro, si riscontrava la fuoriuscita di acqua di portata limitata e tendente ad esaurirsi;
- il peso di volume dei campioni prelevati è pari a 28 kN/m<sup>3</sup>; il modulo elastico secante ricavato con prova a compressione varia tra 10 e 65 GPa, il carico di compressione a rottura varia tra 14 e 20 MPa.

## 3 ANALISI AD ELEMENTI FINITI TRIDIMENSIONALI

Per valutare gli effetti della realizzazione della galleria Battestu sull'esistente galleria Sigemi, sono state eseguite una serie di analisi numeriche tridimensionali con il metodo degli elementi finiti. Il problema non è, infatti, riconducibile a condizioni di deformazione piana.

Le analisi sono state condotte mediante uno studio tridimensionale in campo statico, mentre per la parte dinamica sono state utilizzate valutazioni analitiche sulle vibrazioni indotte.

I calcoli sono stati condotti utilizzando la versione tridimensionale del codice ad elementi finiti FEARSM (Finite Elements Analysis for Rock/Soil Masses), sviluppato da ricercatori del Politecnico di Milano (Gioda et al. 1999).

Le analisi ad elementi finiti sono state svolte simulando lo scavo della galleria Sigemi e successivamente lo scavo della galleria Battestu, così da poter ottenere una valutazione quantitativa degli sforzi indotti sul rivestimento della galleria Sigemi per effetto della realizzazione della galleria Battestu.

Nella Tabella 1 si riporta lo schema di sintesi della caratterizzazione geomeccanica così come presentata nei

documenti progettuali della galleria Battestu.

Tabella 1: Schema di sintesi della caratterizzazione geomeccanica

Gruppo geo-meccanico	RMR	GSI	Co [MPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$m_i$
G2	61	50-60	55-65	27,5-28,5	15-19
G4	39	25-35	45-60	27,5-28,5	15-19

dove:

- RMR: indice classificativo di Beniaowski;
- GSI: indice di Hoek ricavato a partire dall'indice classificativo RMR;
- Co: resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta;
- $\gamma$ : peso dell'unità di volume della roccia;
- $m_i$ : parametro che rappresenta il comportamento non lineare nel criterio di resistenza di Hoek e Brown per la roccia intatta.

La scelta dei parametri meccanici da utilizzare nelle analisi ad elementi finiti è ricaduta su due gruppi geomeccanici, G2 (soluzione meno conservativa) e G4 (soluzione più conservativa), che definiscono il campo di variazione delle grandezze meccaniche dell'ammasso.

Nella Tabella 2 sono riportati i parametri meccanici adottati nelle analisi.

Tabella 2: Parametri meccanici adottati nelle analisi

Gruppo geo-meccanico	E [MPa]	c [kPa]	$\phi$ [°]	$\nu$ [-]	$\psi$ [°]
G2	10000	500	50	0,3	0.0
		3800	37		
		12000	15		
G4	2500	100	45	0,3	0.0
		2000	30		
		8000	15		

dove:

- E = modulo di Young,
- c = coesione efficace,
- $\phi$  = angolo di attrito efficace,
- $\nu$  = coefficiente di Poisson,
- $\psi$  = angolo di dilatanza.

Partendo dal criterio di rottura dell'ammasso roccioso di Hoek-Brown, si è definito un criterio di rottura di Mohr-Coulomb che nel piano di Mohr può essere ben approssimato con una curva trilineare. Per ogni set di parametri sono quindi stati definiti tre valori di coesione e angolo di attrito da inserire come dati dell'analisi.

Per quanto riguarda le caratteristiche del rivestimento, è stato scelto, sia per la calotta sia per l'arco rovescio, un valore di modulo elastico  $E = 20000$  MPa, un coefficiente di Poisson  $\nu = 0,2$  ed uno spessore  $h = 20$  cm.

Il reticolo di elementi finiti tridimensionale utilizzato per discretizzare il problema è riportato nella Figura 4,

approfitando della doppia simmetria del problema in quanto le gallerie si incrociano con un angolo prossimo a 90°.

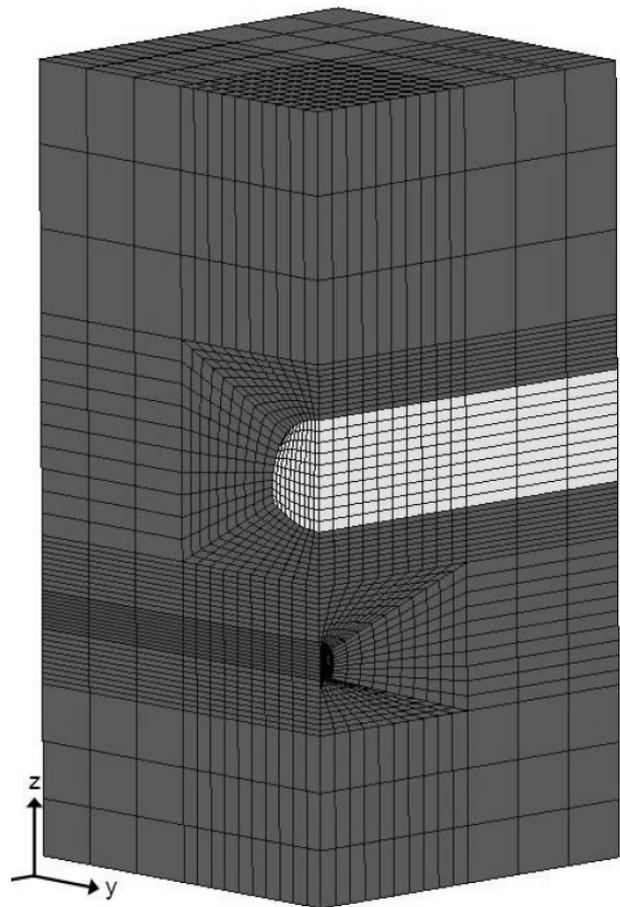


Figura 4: Reticolo di elementi finiti (o mesh) utilizzato per discretizzare il problema (vista assonometrica)

Generalmente l'estensione del disturbo nel terreno causato dallo scavo di una galleria può raggiungere dimensioni notevoli (dell'ordine di 1÷3 volte il diametro della galleria, anche in funzione delle caratteristiche geomeccaniche del terreno) pertanto si è scelto di discretizzare una porzione di campo sufficientemente grande da evitare eventuali disturbi di bordo.

La distanza tra la zona superiore della mesh e la chiave della calotta della galleria Battestu rappresenta l'effettiva copertura presente in sito.

Per la realizzazione del reticolo di discretizzazione sono stati utilizzati elementi isoparametrici tridimensionali a 8 nodi (brick) per l'ammasso roccioso e elementi di guscio (shell) per entrambi i rivestimenti.

Il reticolo di discretizzazione così composto risulta costituito da 13972 nodi, 12194 elementi "brick" e 780 elementi shell.

Il comportamento meccanico degli elementi che discretizzano l'ammasso roccioso è di tipo elasto-plastico, caratterizzato da opportuni valori della coesione e dell'angolo di attrito in termini di sforzi efficaci. Per gli elementi strutturali (elementi shell) si è assunto un comportamento di tipo elastico lineare.

La prima parte dell'analisi ha lo scopo di determinare

lo stato di sforzo nell'ammasso roccioso prima della realizzazione della galleria Sigemi. A partire dallo stato di sforzo geostatico è stata simulata la realizzazione dello scavo della galleria Sigemi rimuovendo in cinque passi gli elementi interni al perimetro della galleria Sigemi. Al termine dello scavo della galleria sono stati attivati gli elementi shell che rappresentano il rivestimento definitivo della galleria Sigemi.

Si è quindi simulato lo scavo della galleria Battestu, rimuovendo in sette passi gli elementi interni.

Nella Figura 5 si riportano le curve di livello degli spostamenti per l'analisi più cautelativa (G4).

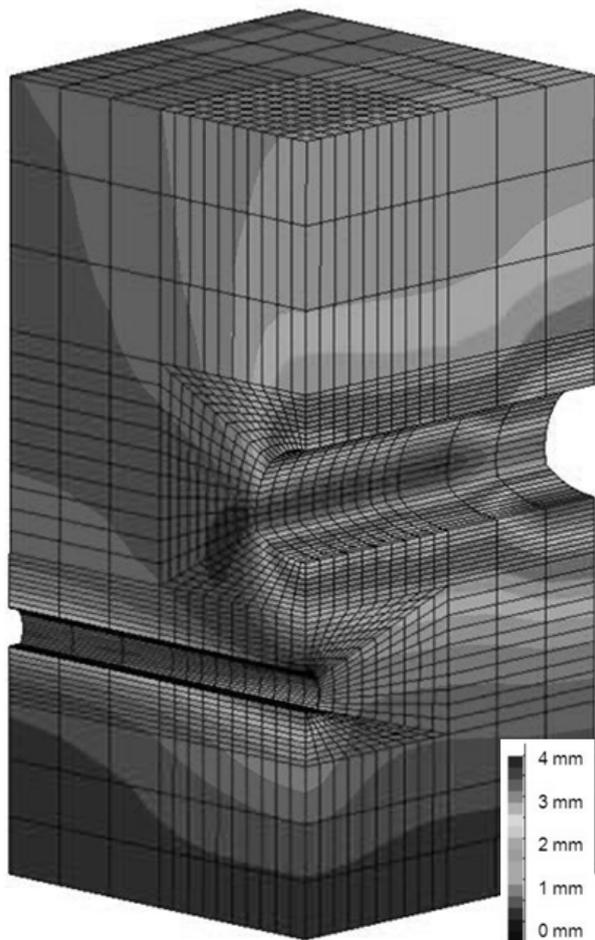


Figura 5 Spostamenti al termine dello scavo della galleria Sigemi – classe geomeccanica G4

Nella Figura 6 è riportato il diagramma del confronto tra i domini di resistenza del rivestimento definitivo della galleria Sigemi e le azioni applicate determinate al termine della simulazione dello scavo della galleria Battestu.

Analizzando i risultati delle analisi ed in particolare le azioni applicate sul rivestimento della galleria si osserva che lo scavo della galleria Battestu produce una variazione delle azioni interne agenti sul rivestimento della galleria Sigemi, che sebbene di ridotta entità, inducono delle trazioni sul calcestruzzo non armato attualmente scarico.

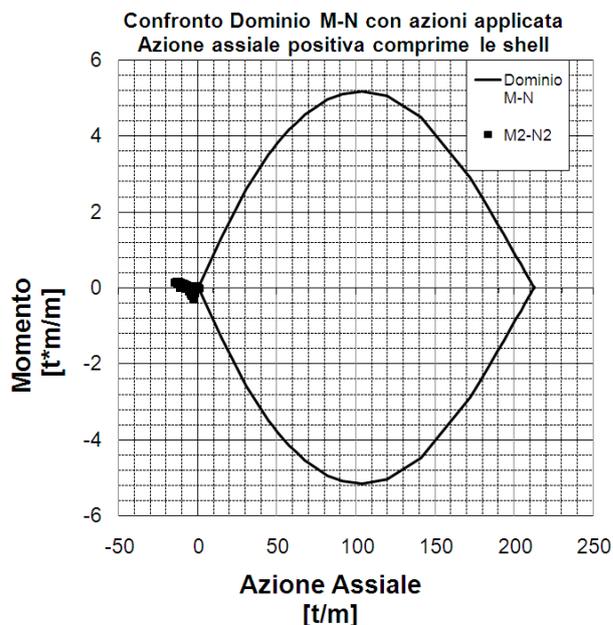


Figura 6: Confronto tra i domini di resistenza del rivestimento definitivo e le azioni applicate per l'analisi con il set di parametri G4

In particolare, come mostrato in Figura 7, le trazioni si sviluppano in corrispondenza dell'estradosso della calotta e dell'intradosso dei piedritti.

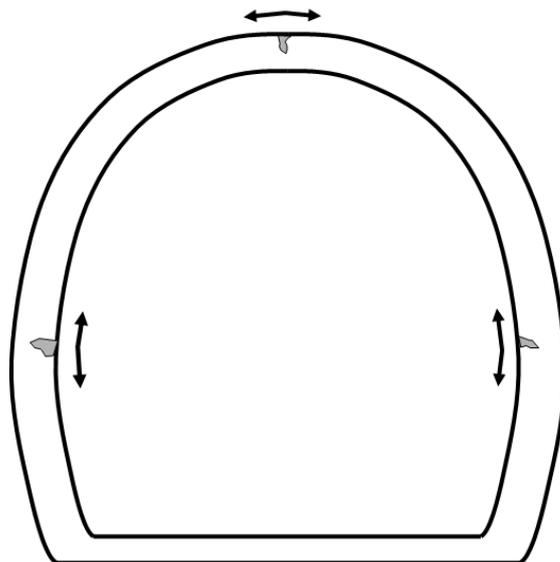


Figura 7: Possibile cinematiso di attivazione fessurazioni

#### 4 LEGGE SISMICA DI SITO

Preventivamente all'esecuzione delle prime volate, effettuate a distanza comunque notevole (>300 m) dalla galleria Sigemi esistente, è stata svolta una serie di prove di volata necessarie per la definizione della legge sismica di sito utilizzando le misure vibrometriche di strumenti posti a varie distanze del punto di sparso della volata.

La vicinanza di altre strutture interferenti, impone l'uso di un approccio per il quale risultano fondamentali i contributi di Piovano et al. (1994), e l'uso di norme

specifiche, quali la tedesca DIN 4150 (Figura 8).

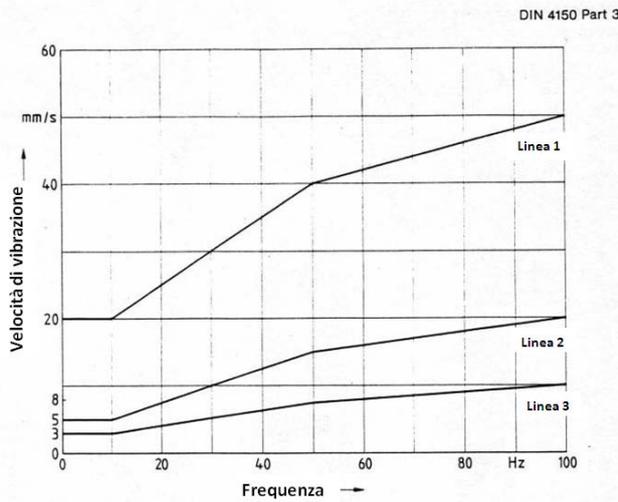


Figura 8: Grafico dei limiti di vibrazione tollerabili (DIN 4150)

Tale norma (in particolare la “Part 3 – Structural vibration in buildings – Effects on structures”), risulta ampiamente in uso nell’area europea e italiana, e prossimamente sarà parte delle raccomandazioni europee per i limiti di vibrazioni accettabili sugli edifici e/o strutture.

La norma sintetizza in un grafico i valori di tollerabilità alle vibrazioni di tre categorie di strutture in funzione della frequenza del fenomeno vibratorio, rispettivamente Linea 1 – edifici industriali, Linea 2 – edifici civili residenziali e Linea 3 - gli edifici storici e/o con strutture sensibili.

Poiché la galleria Sigemi, insieme agli oleodotti in essa contenuti, è classificabile fra le strutture di evidente importanza strategica, il limite di riferimento adottato è quello della Linea 3 relativa alle strutture più sensibili.

Le misure degli effetti delle volate sono state impostate disponendo sette vibrometri a varie distanze (variabili da 52 a 289 m) dal punto di sparo, sia su affioramenti rocciosi, sia su alcune strutture preesistenti, solidali all’ammasso.

Le caratteristiche delle cinque prove di volata sono riportate nella Tabella 3.

Tabella 3 - Caratteristiche prove di volata

Prova di volata n.	Campo [m]	Carica massima contemporanea [kg]
1	1,5	5,02
2	1,5	7,52
3	2,0	10,03
4	2,0	11,30
5	3,0	12,54

Dalle misure vibrometriche nelle tre direzioni spaziali è stato possibile elaborare una serie di analisi nel campo delle frequenze (mediante elaborazione FFT- Fast Fourier Transform), che permettono di identificare quali siano le frequenze predominanti della singola volata e quindi determinare il valore di vibrazione da confrontare con i limiti imposti.

A scopo d’esempio, la Figura 9 mostra l’output automatico del rilievo effettuato nella 4° prova di sparo sul geofono V5 posto ad una distanza di circa 67 m dal punto di sparo. Si può evidenziare che i valori di vibrazione maggiore si presentano, per questo caso specifico, a frequenze tra 40 e 70 Hz, e rimangono comunque elevati per frequenze >100 Hz.

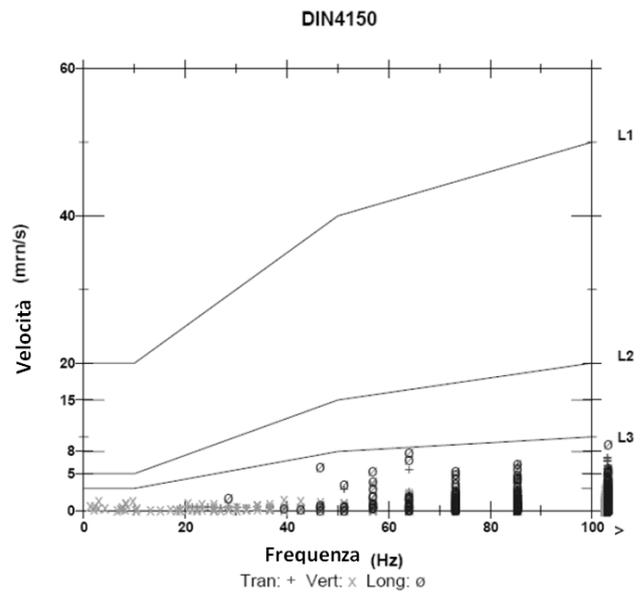


Figura 9: Misure su geofono V5 - prova di volata n.4

La Figura 10 mostra l’andamento della vibrazione nel tempo nelle tre direzioni spaziali (Longitudinale, Trasversale e Verticale).

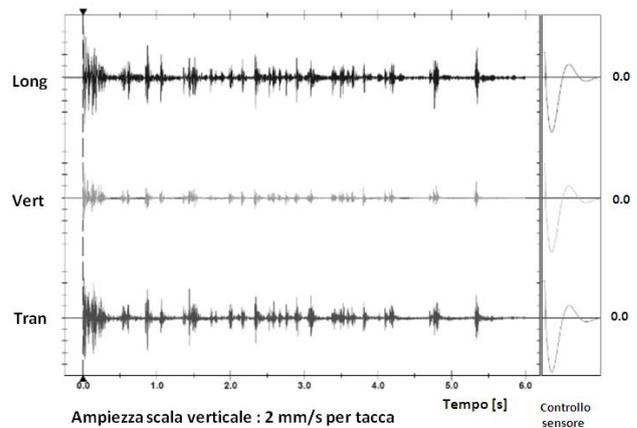


Figura 10 Misure su geofono V5 – Prova di Volata n.4

In questo grafico si evidenziano i “colpi” successivi con i relativi ritardi temporali. Si noti che l’ampiezza maggiore si ha nell’esplosione della “rinora” vale a dire del cuore del fronte di scavo che viene estruso dal fronte per primo al fine di consentire l’alleggerimento delle esplosioni successive al suo contorno.

Dall’analisi dei risultati delle prove sono state ottenute le seguenti considerazioni:

- le velocità di vibrazione sono comprese tra 0,29 mm/s e 10,90 mm/s.
- su alcune prove sono stati accertati fenomeni vibratorii rilevanti con frequenze già a 10 e 15 Hz;

- tutte le prove mostrano un importante campo di frequenze attorno ai 40 Hz, in subordine a 50, 60, 70 Hz.

Si fa notare che le frequenze più pericolose per le strutture (edifici e galleria) sono quelle più basse in quanto più prossime alle frequenze proprie delle strutture e possibile causa di effetti di risonanza.

La Figura 11 riporta un diagramma complessivo di tutte e cinque le prove di volata, esprimendo su scala bilogarithmica la velocità di vibrazione in funzione della distanza scalata, cioè la distanza tra il punto di misura ed il punto di sparo diviso per la radice quadrata della quantità istantanea massima di esplosivo.

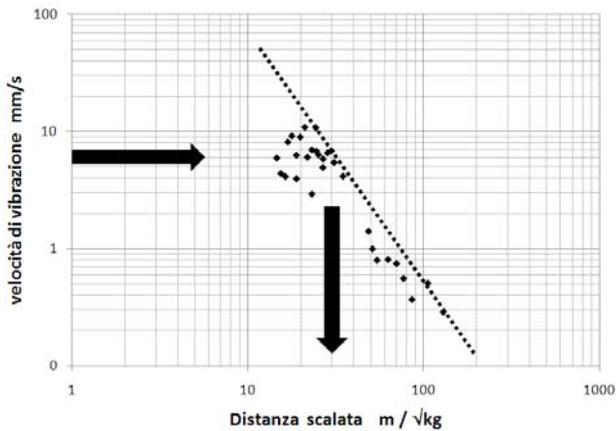


Figura 11: Velocità di vibrazione / Distanza scalata.

Nella Figura 11 è stata tracciata una linea di “massimo” che comprende tutte le prove. Tale retta nel campo bilogarithmico costituisce la legge sismica di sito specifica per questo ammasso e per la conformazione geometrica di volata qui adottata.

Usando come riferimento la Linea 3 della Norma DIN 4150, in corrispondenza del campo di frequenza più restrittivo di 40 Hz si ricava un valore di tollerabilità alla vibrazione di poco inferiore a 7 mm/s.

Quindi, utilizzando il grafico di Figura 11, partendo dall'asse delle ordinate da tale valore di velocità di vibrazione, si ottiene in ascissa un valore di distanza scalata pari a circa 30 m/√kg.

Con questi riferimenti la distanza di sicurezza (vale a dire la distanza del recettore dal punto di sparo, al di sotto della quale le vibrazioni superano i limiti) risulta intorno agli 80 m con i quantitativi di carica inferiori (5,02 kg) e campo di avanzamento di 1,5 m.

Per distanze ancora inferiori è quindi possibile già prevedere la necessità di modificare lo schema di volata se non addirittura abbandonare l'uso di esplosivo verso modalità di scavo meno impattanti.

## 5 PIANO DI MONITORAGGIO

A valle dell'esecuzione delle cinque prove di volata, avuta la conferma che il disturbo alla galleria Sigemi si sarebbe potuto sviluppare nell'avvicinarsi con lo scavo a distanze

tra 80 e 100 m, si è ritenuto fondamentale prevedere l'installazione di un sistema di monitoraggio specifico per la galleria Sigemi.

Tale sistema ha previsto l'uso di due vibrometri triassiali, installati nel punto di intersezione tra la galleria Sigemi ed il tracciato previsto per la costruenda galleria Battestu: uno solidale al rivestimento della galleria ed uno immerso alla putrella montante del castello reggitubi posto nelle adiacenze.

Vista la presenza di oleodotti e la necessità di strumentazione a protezione ATEX è stato imposto un sistema di sgancio automatico di tensione elettrica comandato da rilevatori di esplosività già presenti nella galleria Sigemi a più progressive.

I vibrometri sono stati collegati ad una centralina di acquisizione dati, in grado di acquisire i dati all'attivazione della soglia di trigger stabilita e generare output di comunicazione automatici al superamento di valori preimpostati, oltre a pubblicare su web tutti i dati acquisiti.

La soglia di trigger è stata impostata a 0,5 mm/s, così da attivare la registrazione a valori di sensibilità cautelativi.

I valori soglia di attenzione e di allarme sono stati definiti pari rispettivamente all'80% e al 100% del valore di velocità di vibrazione della Linea 3, variabile con la frequenza.

È stata poi definita una procedura per la quale, al superamento della soglia di attenzione si sarebbe intervenuti a modificare (ridurre) o il campo di sfondamento o il quantitativo di esplosivo, mentre al superamento della soglia di allarme sarebbero stati fermati i lavori per effettuare un sopralluogo nella galleria Sigemi.

Poiché i risultati delle analisi ad elementi finiti mostravano la possibilità di fessurazioni indotte, è stato anche predisposto un sistema di misura delle deformazioni del rivestimento, installando cinque sezioni a passo di 2,5 m, costituite da tre deformometri l'una in un tratto di 10 m a cavallo del punto di intersezione tra la galleria Sigemi ed il tracciato della galleria Battestu.

Per ogni sezione strumentata sono stati installati un deformometro in calotta ed uno su ogni piedritto, rispettivamente trasversali e paralleli all'asse della galleria.

I deformometri sono stati centralizzati in un'unità periferica e quindi acquisiti da un sistema in grado di registrare i dati a scansioni programmate e trasferirli al server remoto accessibile via web.

Le soglie di attenzione ed allarme per tali strumenti sono state limitate rispettivamente a 50 e 100  $\mu\epsilon$  sia in compressione che in trazione in quanto le fessurazioni in un rivestimento non armato avrebbero potuto svilupparsi sia in intradosso che in estradosso agli stessi livelli di carico.

## 6 MODALITÀ DI SCAVO

Osservando le registrazioni vibrometriche delle prove, si sono confermati gli elevati valori di sollecitazione prodotti dallo sparo della rinora. In particolare, l'ampiezza della

vibrazione nei primi millisecondi risulta almeno doppia di quella rilevata nei tempi successivi per le esplosioni ritardate.

Come si può evidenziare nella Foto 1 (riferita alla quinta volata di prova), la volata ha prodotto una dispersione di materiale di almeno 20-30 m dal fronte di scavo, con conseguente necessità per l'impresa di dover "pulire" (smarinare) un tratto di galleria piuttosto esteso. Una più accurata taratura delle cariche della rinora e dello schema di volata ha permesso di limitare il materiale esploso nei primi 15 m.

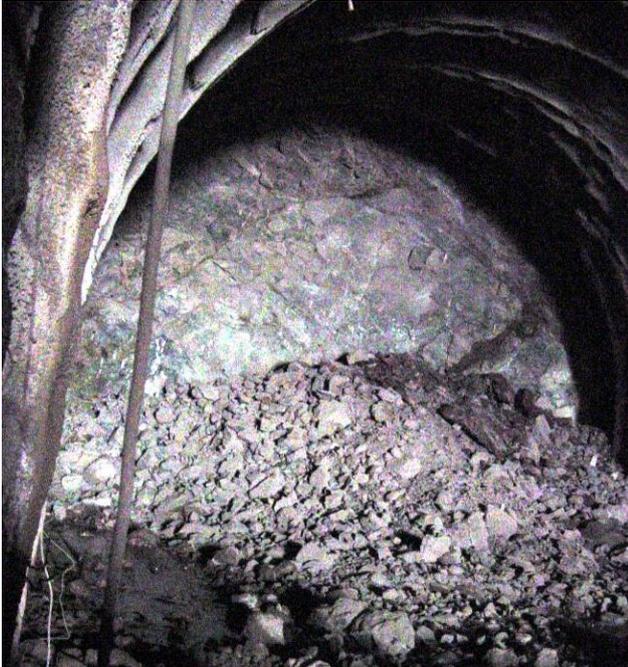


Foto 1 : Fronte di scavo dopo il brillamento della quinta volata di prova

I vibrometri installati hanno fatto registrare valori inferiori alla soglia di attenzione fino al raggiungimento di una distanza di 80 m dalla galleria Sigemi. Gli scavi sono quindi proseguiti con cariche e sfondamenti ridotti fino al raggiungimento di circa 50 m di distanza dalla galleria Sigemi. Nelle ultime due volate, avendo riscontrato valori di velocità di vibrazione superiori alla soglia di allarme, si è abbandonato l'uso di esplosivo. Si è pertanto passati all'uso del martello demolitore di tipo pesante e localmente con qualche foro di alleggerimento.

Il monitoraggio delle vibrazioni ed il sistema di allarmistica è stato mantenuto attivo in quanto le vibrazioni indotte dal martellone presentano campi di frequenze intorno ai 10 Hz comunque pericolose. Le velocità di vibrazione che sono state misurate nel prosieguo dello scavo fino alla rimozione dell'ultimo diaframma si sono mantenute al di sotto della soglia di attenzione, come pure le deformazioni sul calcestruzzo del rivestimento.

Lo scavo con martellone è stato anche applicato al ribasso per l'alloggiamento dell'arco rovescio.

## 7 CONCLUSIONI

Nell'ambito dello studio dell'interferenza tra la costruenda galleria Battestu e la galleria Sigemi, allo scopo di tutelare la funzionalità di quest'ultima è stato necessario effettuare un rilievo strutturale di dettaglio, alcune indagini e prove in sito e analisi di laboratorio.

Tali indagini hanno permesso di determinare le caratteristiche del rivestimento e lo stato tensio-deformativo ivi presente.

Una serie di analisi ad elementi finiti tridimensionali parametrizzati è stata svolta per simulare gli effetti che lo scavo della nuova galleria, a partire dalla stato di sollecitazione pre-esistente, avrebbe indotto sul rivestimento della galleria esistente. Le analisi hanno evidenziato il rischio che si sviluppasse forze di trazione in corrispondenza della calotta e dei piedritti per l'effetto di detensione indotto dallo scavo della galleria sovrastante. Tali azioni agenti su un rivestimento non armato e pressoché scarico, avrebbero potuto indurre l'apertura di fessure.

A valle di cinque prove di volata adeguatamente monitorate è stata determinata la legge sismica di sito. Tale legge ha fornito un limite cautelativo di circa 80 m di distanza tra interferenza e punto di sparo oltre il quale si ha il superamento del limite imposto dalla Linea 3 della norma DIN 4150 per le strutture sensibili.

Per poter gestire il rischio di indurre vibrazioni eccessive sulla galleria Sigemi, è stato installato un sistema di monitoraggio al suo interno composto da vibrometri e deformometri. Tale sistema ha permesso di regolare le attività di scavo in base al riscontro di eventuali superamenti di soglie di attenzione e di allarme prefissate. Lo scavo con esplosivo è stato possibile fino ad una distanza di circa 50 m di distanza dalla galleria Sigemi. Il completamento della galleria Battestu è stato svolto con l'uso di martellone sempre monitorandone gli effetti vibrazionali.

E' possibile affermare che l'approccio e le procedure di analisi qui adottate, con la definizione della legge sismica di sito, risultano applicabili a situazioni analoghe di scavo.

## BIBLIOGRAFIA

- Barla G., Jarre P. (1986). *Metodi Numerici e Metodo degli Elementi Finiti nel Calcolo di Gallerie*. Primo Ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria delle Rocce (MIR) "Recenti Sviluppi e Nuovi Orientamenti nel Campo delle Gallerie", Politecnico di Torino, pp. 13.1-13.35
- Gioda G., Locatelli L., Sterpi D. (1994). *Some examples of finite element analysis of tunnels*. Proc. 8th Int. Conf. of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, West Virginia University, Morgantown, Ed. Balkema.
- Gioda G., Locatelli L. (1999). *Back analysis of the measurements performed during the excavation of a shallow tunnel in sand*. Int.J.Numer. Anal.Methods in Geomechanics, Vol.23, No.13, pp.1407-1426.
- Locatelli L., Di Marco G., Zanichelli C., Jarre P. (2001), *Rehabilitation of Highway Tunnels - Techniques and Procedures*. A.I.T.E.S.-ITA 2001 World Tunnel Congress "Progress In Tunnelling After 2000", Milano.

Cardu M. (2004). *Un criterio per la previsione del danno arrecato a strutture in roccia da brillamenti sotterranei*. GEAM, Parte 1a e Parte 2a, n.4.

Yu T.R., Vongpaisal S. (1996). *New Blast Damages Criteria for Underground Blasting*. CIM Bulletin, Vol 89, n° 998 – pag 139-145.

Dantini E.M. (1994). *Sismicità causata da demolitori idraulici nello scavo di gallerie*. Explosives and Blasting N.1.

Piovano G. (1994). *Criteri di previsione dei valori massimi tollerabili delle vibrazioni indotte dall'uso di esplosivi*. Explosives and Blasting, N.1

Piovano G., Sorlini A. (1994). *Normative e raccomandazioni sulle vibrazioni: criteri di salvaguardia, tollerabilità degli edifici e delle persone, scelta dei parametri valutativi*. Explosives and Blasting N. 1.

Fornaro M., Patrucco M., Sambuelli L. (1994). *Vibrazioni indotte dalle mine, martelloni e frese; esperienze nello scavo di gallerie in Italia*. Gallerie e grandi opere in sotterraneo, n. 44.

Berta G. (1993). *Vibrazioni indotte dalle volate nello scavo di gallerie*. Gallerie e grandi opere in sotterraneo, n. 40.

Piovano G. (1992). *Controllo delle vibrazioni nell'uso dell'esplosivo*. Gallerie e grandi opere in sotterraneo, n. 38.

Folchi R., Simonetti S. (1992). *Le sollecitazioni indotte nell'ammasso roccioso dall'esplosivo – Analisi e controlli durante lo scavo della galleria “ Scindo Passo” a Favignana (TP)*. Gallerie e grandi opere in sotterraneo, n. 36.

Page C.H. (1987). *Controlled Blasting for Underground Mining*. 13th Conf. on Explosives and Blasting Technique, ISEE Miami, Florida 33-48.

Bewniawsky Z. T. (1989). *Engineering rock mass classification*, Wiley, New York.

Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002). *Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition*, Proceedings of the North American Rock Mechanics Society Meeting, Toronto, Canada, 1-6.

Grasso P., Russo G. (2006). *Un aggiornamento sul tema della classificazione geomeccanica e della previsione del comportamento allo scavo*. Gallerie e Grandi Opere in sotterraneo, N° 80 pag 56-64.

Zienkiewicz O. C. (1977). *The finite element method* Vol 1 and 2. Ed. McGraw -Hill.

Zienkiewicz O. C., Valliapan S., King I. P. (1969). *Elasto-plastic solution of engineering problems, “initial stress”, finite element approach*. Int. J. Num. Meth. in Eng., Vol 1.

Charles H. Dowding (1985). *Blast vibration monitoring and control*.

U. Langefors and B. Kilhstrom, (1968) *Rock Blasting*, John Wiley & Sons Inc; 2nd edition.

AFTES (1994). *The choice of geotechnical parameters and tests useful to the design, dimensioning and*

*construction of underground structures.*

AFTES working group n.7 – *Temporary support and permanent lining, Consideration on usual methods of tunnel line design.*

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'Ing. Andrea Stagni di SIGEMI per il suo supporto e per avere messo a disposizione l'oggetto del lavoro.

Si ringrazia l'ing. Achille Sorlini di Geodata per la correttezza del confronto tecnico, l'AMIU di Genova nella persona dell'Arch. Giovinazzo, COESTRA Impresa esecutrice dei lavori e l'ing. Ercan di GDTest.

Un apprezzamento al nostro collaboratore ing. Giuseppe Piovano per la sua decennale esperienza nel campo degli scavi con esplosivi e delle misure di vibrazione.

Infine un ringraziamento particolare al Prof. Giancarlo Gioda del Politecnico di Milano per l'assistenza nello sviluppo del fondamentale modello FEM tridimensionale, brillantemente applicato nell'occasione dall'ing. Alessio Contini già prezioso collaboratore di Golder ora in SPEA.

## ABSTRACT

### THE INTERFERENCE OF D&B TUNNEL WITH AN EXISTING OIL PIPELINE TUNNEL

Keywords: tunnelling, monitoring, vibrations, alarm system, 3D modelling

This paper aims at presenting a case history of the solution of the interference of the excavation of a two lanes tunnel by means of drill and blast (D&B) method passing above the crown at less than 10 m of an existing tunnel containing several pipelines providing a unique connection between Genoa and Milan Refineries.

The work is described starting from the tunnel assessment and a 3D Finite Element Model to simulate the static effect of the excavation. Then a seismic assessment has been obtained from initial blast tests.

The Monitoring of pipelines and tunnel liners has been provided with special care in measuring vibrations velocity and strains in real time triggered on each blast explosions. Limits based on classification of structures and on frequency of vibration has been adopted to protect the sensible structure in order to avoid risky conditions on pipelines safety and on the possible stops of gasoline flux.

The final solution on the front excavation method approaching the interference zone has been analyzed and verified step by step accordingly to the monitored parameters.

A law of vibration transfer has been then provided that can be used also in other conditions where tunnels interfere with other close structures in order to preventively prepare excavation procedures minimizing the risk.