

Demolizioni con Esplosivi

# Calcolo delle onde sismiche da impatto al suolo di gravi

L'ADEGUAMENTO IN SEDE DELL'A3 HA DI FATTO RICHIESTO LA DEMOLIZIONE-RICOSTRUZIONE DI MOLTI VIADOTTI IN CALCESTRUZZO ARMATO. LA SCELTA, AUDACE, DI PROCEDERE IN TALUNI CASI ALL'ABBATTIMENTO DEI MANUFATTI TRAMITE ESPLOSIVI, HA PERMESSO DI RICAVARE UNA FORMULA SPEDITIVA UTILE AL PROGETTISTA PER IL CALCOLO DELLA VELOCITÀ DI VIBRAZIONE INDOTTA.

**Roberto Folchi**

**Andrea Francioso**

**NITREX explosives engineering**

**Pasquale Stella Brienza**

**ingegnere libero professionista**

**I**lavori di adeguamento alle normative europee dell'autostrada Salerno Reggio Calabria hanno reso necessarie modifiche di tracciato e la rispondenza alla normativa sismica. Per queste ragioni si sono dovuti demolire molti viadotti. Alcuni, dopo 40 anni di esercizio, con azione combinata di vento, gelo e corrosione per il sale sparso in inverno, hanno subito una non trascurabile riduzione delle condizioni statiche. Per mantenere la fruibilità dell'autostrada, i lavori hanno interessato una carreggiata alla volta, così che tutto il traffico da Nord e da Sud è spostato su una delle due carreggiate. Le demolizioni sono dunque state effettuate prima in adiacenza ai viadotti vecchi, poi a quelli nuovi.

Laddove è stato possibile effettuare la demolizione meccanica o con esplosivi, in alternativa alla decostruzione che ha costi una decina di volte superiori, è stato necessario operare in modo da contenere le sollecitazioni prodotte dall'impatto al suolo di impalcati e pile, entro valori tali da garantire la

non insorgenza di danni ai recettori sensibili all'intorno. Nel novero dei recettori rientrano i viadotti adiacenti in esercizio, cavidotti ad acqua, olio e gas, questi ultimi spesso sottostanti i viadotti da demolire. Talvolta anche le stesse pile dei viadotti demoliti dovevano essere salvaguardate per essere inglobate nelle nuove opere d'arte. Inoltre, nel corso degli anni, a ridosso della rete autostradale, sono state costruite parecchie abitazioni così che anche per queste, a distanze maggiori ma di meno resistente costruzione, è stato necessario effettuare una preventiva verifica delle sollecitazioni indotte così da minimizzare sia i rischi di insorgenza danno che il disagio ai residenti. Per l'esecuzione di queste demolizioni, cosiddette "controllate", è dunque necessario effettuare la preliminare verifica del contenimento delle sollecitazione entro valori tali da garantire, al 100%, la non insorgenza di danni ed anche di disagio. Per calcolare vibrazioni e sollecitazioni prodotte degli esplosivi sono disponibili modelli, collaudati in anni di





**1. Viadotto a campate da 32 metri a 4 travi a doppio T, a varie altezze da terra**

**2. Viadotto di fig. 1 abbattuto al suolo dalla demolizione delle pile**

pratica. Per quanto riguarda invece vibrazioni e sollecitazioni indotte dall'impatto al suolo, normalmente si utilizzano dei modelli fisici, considerando le vibrazioni come direttamente correlate all'energia cinetica del grave impattante e questa coincidente all'energia potenziale. Tuttavia, una grossa parte dell'energia cinetica per l'impatto è assorbita dai fenomeni di comminazione del grave impattante così che i risultati ottenuti con il modello fisico sono spesso molto conservativi, non utilizzabili là dove le distanze dai recettori sono ridotte. In letteratura tecnica non è stata trovata una formula sperimentale per la previsione dell'ampiezza delle onde sismiche indotte dall'impatto al suolo di gravi delle dimensioni di parecchie centinaia di tonnellate quali, appunto, le campate in calcestruzzo armato di un viadotto. Anche su incoraggiamento dei tecnici dell'ANAS, è stato dunque ritenuto utile effettuare una ricerca mirata appunto alla definizione di questa formula e all'individuazione del campo di variazione delle frequenze

predominanti associate. Il numero consistente di demolizioni con esplosivo effettuati sulla A3, Salerno-Reggio Calabria, ha consentito l'acquisizione di un campione significativo di dati. Nel presente articolo è dunque riportata la formula ricavata da questa ricerca, per il calcolo dell'ampiezza della velocità di vibrazione indotta a distanza dal punto d'impatto di una campata di viadotto in calcestruzzo armato, al variare della sua altezza dal suolo e della sua massa ovvero al variare della sua energia potenziale.

La formula è stata calcolata mediante regressione di potenza di misurazioni sismiche effettuate durante la demolizione di viadotti con campate di lunghezza tra 16 e 45 metri e altezze tra 45 e 6 metri. Per completezza di sintesi, nella presente articolo è anche riportata l'analisi delle frequenze predominanti dei transienti sismici, indicazioni sulla procedura d'acquisizione dei dati nonché la forma d'onda e l'analisi di un evento sismico rappresentativo.

## Demolizione di viadotti con esplosivi

Gli impalcati abbattuti (donatori) erano stati realizzati in calcestruzzo armato con soletta da 20 cm su 3 o 4 travi a doppio T o su 2 travi a V. La lunghezza variava da 16 a 45 m (figg. 1, 2, 7 e 9). La costruzione di tutti risaliva agli anni '60 e '70. Le misurazioni sono state eseguite su varie tipologie di recettori sensibili (i manufatti che hanno risentimento per le onde sismiche):

- manufatto residenziale o commerciale: distanza minima 25 m,
- viadotto in esercizio e pile del viadotto demolito: in adiacenza (alcuni centimetri),
- gasdotto: min. 12 m (sottostante),
- traliccio di linee elettriche (anche con linee aeree sopra le fasce minate): min. 10 m,
- gallerie stradali: min. 40 m.

## La misura delle onde sismiche

Le misure sono state effettuate secondo una procedura aziendale basata sulle normative [DIN 4150-1, 2001], [DIN 4150-3, 1999] e sulle specifiche [ISEE *field practice guidelines for blasting seismographs*, 2009].

Le specifiche tecniche principali della strumentazione di misura sono riportate nella tab. 1.

Le misure sono state effettuate sulle fondazioni dei recettori all'intorno così da poter confrontare i valori registrati con quelli limite imposti dalla normativa DIN per la garanzia di non insorgenza danni e disagio.

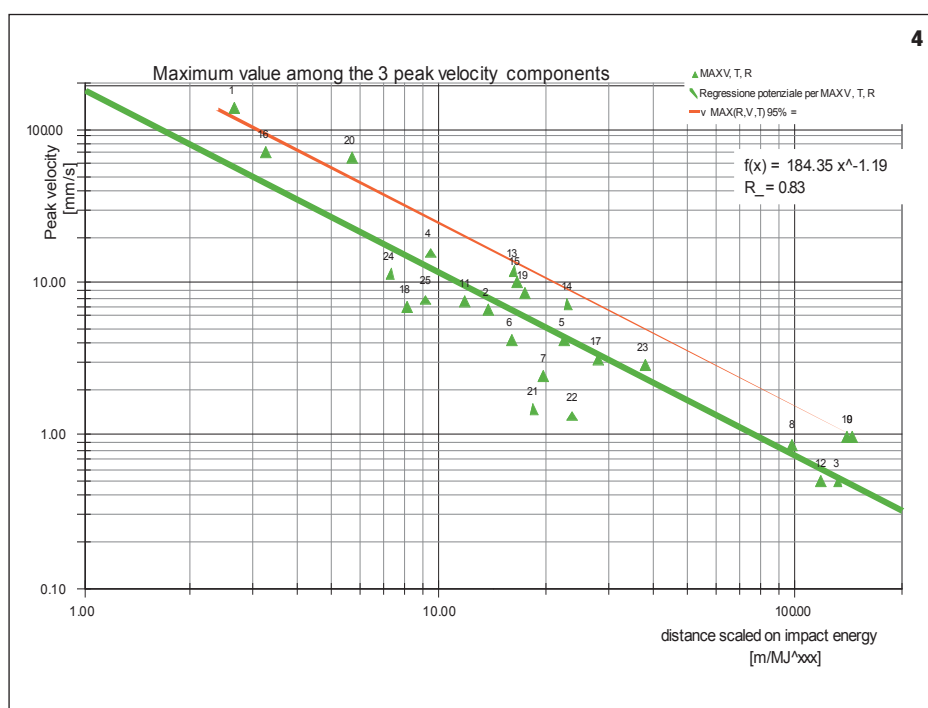
Per avere garanzia della non interferenza del punto di misura con l'evento sismico prodotto dalla demolizione, è stata effettuata una preliminare caratterizzazione sismica mediante energizzazione impulsiva. Da questa è stato possibile verificare che le frequenze di oscillazioni proprie del punto di misura non fossero di ampiezza confrontabile a quelle dell'impulso sismico per la demolizione e che quindi, la risonanza non avrebbe alterato la significatività della misura.

La distanza del punto di misura dall'impalcato è stata calcolata considerando il punto d'impatto coincidente con il baricentro della campata abbattuta.

I trasduttori sono sempre stati ammortati con barre filettate, al punto di misura (fig. 3).

**TAB 1. SPECIFICHE TECNICHE DELLE CENTRALINE DI MONITORAGGIO SISMICO UTILIZZATE PER IL CAMPIONAMENTO**

Tipo trasduttori	velocimetri
Risposta in frequenza	3 - 400 Hz $\pm$ 2%
sensibilità	geofono in configurazione x0,25", 1 mm/s (fondo scala 2000 mm/s)
	x1 pari a 0,25 mm/s (fondo scala 500 mm/s)
	x2 pari a 0,125 mm/s (fondo scala 250 mm/s)
	x4 pari a 0,0625 mm/s (fondo scala 125 mm/s)
	x8 pari a 0,0313 mm/s (fondo scala 63 mm/s)



## Calcolo dell'ampiezza delle vibrazioni prodotte dalla caduta degli impalcati

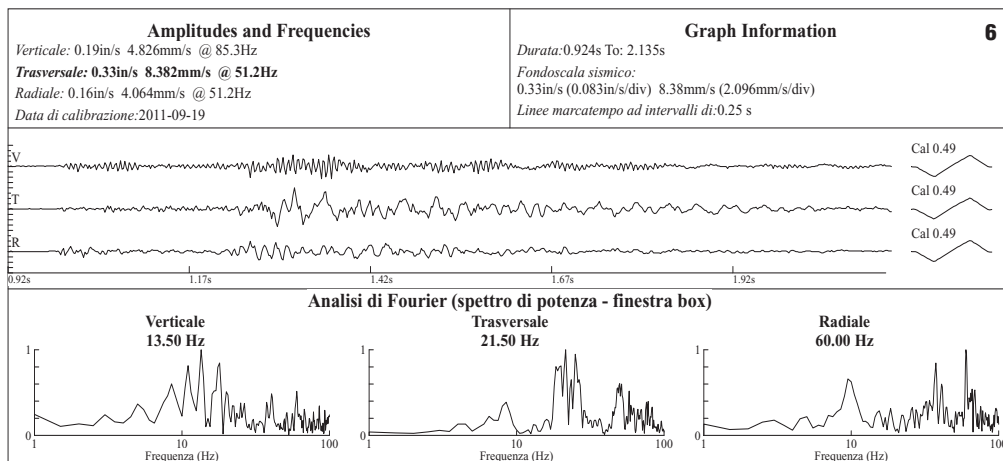
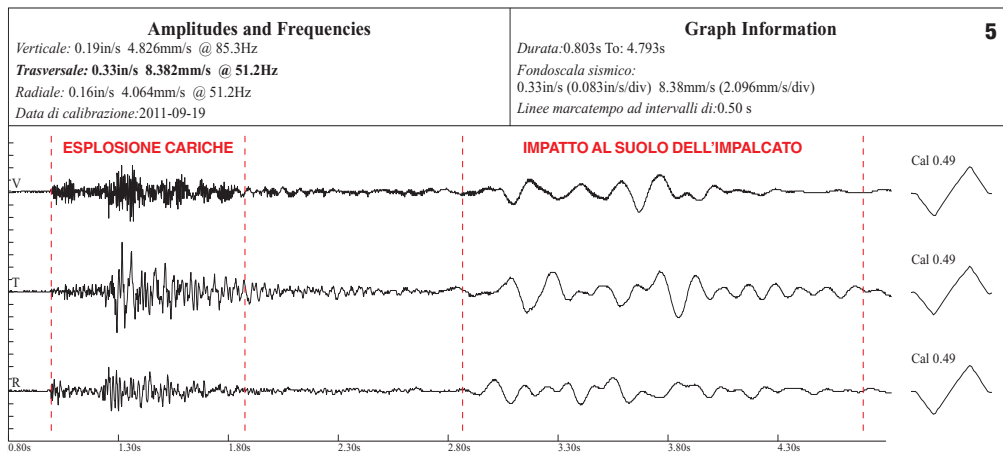
Per imprecisioni delle misure di distanza ed altezza, per variazioni delle costanti elastiche e di resistenza del terreno di trasmissione delle onde sismiche, ecc., i valori di velocità di vibrazione misurati dimostrano una certa variabilità a parità di energia potenziale. Per poter estrarre, da questa nube di punti sperimentali, un valore univoco, è stato utilizzato il procedimento statistico della regressione di potenza, ovvero è stata calcolata la curva che meglio rappresenta tutti i punti sperimentali, scegliendo tra tutte le possibili, quella la cui somma del quadrato della distanza da ciascun punto è la minore di tutte (regressione di potenza).

Dalla regressione di potenza dei valori massimi di vibrazione<sup>1</sup> misurati al variare dell'altezza, della massa dell'impalcato e della distanza dal punto di misura, è derivata la seguente leg-

**3. Accoppiamento del trasduttore di velocità triassiale al muro portante di un'abitazione**

**4. Curve dei limiti di fiducia al 50% ed al 95% dei valori massimi di vibrazione indotti dall'impatto al suolo di un impalcato data energia potenziale (massa per altezza)**

<sup>1</sup> La massima tra le tre componenti del vettore velocità: verticale, orizzontale trasversale ed orizzontale longitudinale.



**5. Onda sismica prodotta dall'esplosione per la rottura dei vincoli all'appoggio di un impalcato e per il suo successivo abbattimento al suolo (dopo 1,75 s). Massa e altezza dell'impalcato erano rispettivamente pari a xxx kN e xxx metri. Il punto di misura dell'onda sismica era posto a xxx metri dal baricentro d'impatto**

**6. FFT dei treni d'onda delle onde sismiche per l'esplosione delle cariche, di cui alla fig. 5**

**7. Abbattimento con esplosivi degli impalcati di un viadotto in area antropizzata**

2. 390 t \* 9,81 kN/t



ge di decadimento (limiti di confidenza al 50% ed al 95%):

- $V_{MAX(V,R,T)} 50\% = 184 * (R/E0,19)^{-1,2}$ ,
- $V_{MAX(V,R,T)} 95\% = 387 * (R/E0,19)^{-1,2}$ ,

dove:

- $V_{MAX(R,V,T)} 50\%$  [mm/s]: velocità massima di vibrazione probabile (ha il 50% di probabilità di non essere superata),
- $V_{MAX(R,V,T)} 95\%$  [mm/s]: velocità massima di vibrazione di sicurezza (ha il 95% di probabilità di non essere superata),
- $R$  [m]: percorso sismico dal punto di misura al baricentro dell'area di caduta del manufatto,
- $E$  [MJ]: energia di impatto, equivalente all'energia potenziale dell'impalcato, calcolata moltiplicando la massa del grave per l'altezza media di caduta.

Questa curva, rappresentata in un diagramma bilogarithmico, assume la forma di retta (fig. 4).

Dalla formula ricavata, ad esempio, è possibile la velocità massima di vibrazione prodotta alla distanza di 60 metri dall'impatto di un impalcato da 390 tonnellate, posto ad un'altezza da terra di 30 metri, l'energia di caduta sarà pari a:  $3.826^2 \text{ kN} * 30 \text{ m} = 115 \text{ MJ}$

- $V_{MAX(R,V,T)}$  [mm/s] - velocità di vibrazione probabile:  $184 * (60/115^{0,19})^{-1,2} = 4,0 \text{ mm/s}$ ;
- $V_{MAX(R,V,T)}$  [mm/s] - velocità di vibrazione di sicurezza:  $387 * (60/115^{0,19})^{-1,2} = 8,4 \text{ mm/s}$ .

## Analisi di un evento sismico significativo

L'impalcato, una volta che i vincoli che lo tengono sospeso al piovino, sono stati demoliti dalle cariche d'esplosivo, inizia la sua corsa verso il basso. La discesa non è immediata a cau-

sa del tempo necessario<sup>3</sup> ai gas d'esplosione per spazzare, dalla gabbia d'armatura, il calcestruzzo frantumato dall'onda d'urto. Trascurando la resistenza opposta dall'aria alla caduta, non rilevante per percorsi dell'ordine del centinaio di metri, il tempo (t) trascorso in caduta, al variare del percorso (S), è pari a:  $t = ((2 * S) / 9,81)^{0,5}$ .

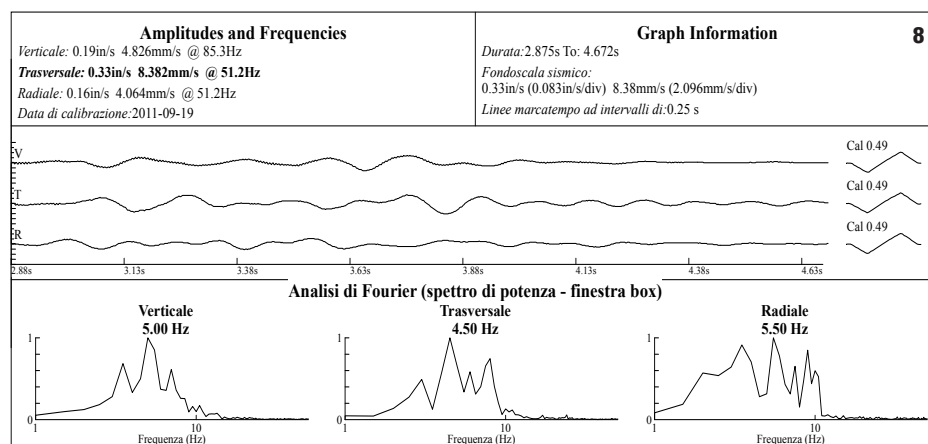
Per la caduta da 10 metri, il tempo intercorrente tra il brillamento e l'impatto è dunque maggiore di 1,43 secondi. Se la misura sismica è effettuata a distanze dell'ordine del centinaio di metri, questo intervallo di tempo è sufficiente a consentire la non sovrapposizione della forma d'onda per l'esplosione a quella per l'impatto. A distanze superiori del centinaio di metri, per il graduale trasferimento dell'energia dell'impulso sismico per l'esplosione, dalle frequenze più alte a quelle più basse, si ha dunque un "appiattimento" dell'onda sismica con possibile sovrapposizione a quella successiva per l'impatto, soprattutto per i percorsi di caduta non elevati e per le misure a distanza. Le onde sismiche prodotte dall'esplosione si propagano nel calcestruzzo a velocità di circa 3.300 m/s e, successivamente, nelle formazioni all'intorno, a velocità variabili in funzione delle consistenze del terreno, prevalentemente tra 1800 e 3000 m/s. Nella fig. 5 è riportata la forma d'onda registrata dall'impatto al suolo d'un impalcato abbattuto con esplosivi. Massa e altezza da terra dell'impalcato erano rispettivamente pari a 44 kN e 17 metri. Il punto di misura era posto a 45 metri. Nella figg. 6 e 8 sono riportate le frequenze caratteristiche del treno d'onda per l'esplosione e di quello per l'impatto.

## Frequenze caratteristiche del treno d'onda sismico

Dalle misure effettuate si rileva che le frequenze di vibrazione del terreno, associate al brillamento degli esplosivi variano tra 35 Hz a 120 Hz nella struttura di calcestruzzo armato, per poi decadere rapidamente durante la propagazione all'intorno. Le frequenze delle onde sismiche per l'impatto degli impalcati sono molto più basse, variando tra 2 Hz a 28 Hz, quindi più vicine alle frequenze caratteristiche dei tipici manufatti all'intorno ovvero tali da innescare fenomeni di risonanza. Gli spostamenti associati a fenomeni vibratorii a frequenza maggiore sono minori così che, a parità di ampiezza, le vibrazioni indotte dalle esplosioni comportano rischi intrinseci minori rispetto a quelle per l'impatto al suolo.

## Cuscino di smorzamento

La pratica di interporre, sul letto di caduta, un cuscino di smorzamento in terra, sebbene a breve distanza riduca l'ampiezza del picco di velocità di vibrazione, a media e lunga distanza non comporta significative riduzioni dell'ampiezza. Questo "cuscino" rallenta la velocità d'impatto, e quindi l'energia cinetica, ma riduce i fenomeni di frantumazione del calcestruzzo i quali assorbono una considerevole frazione d'energia. L'energia trasferita al terreno (l'impulso) resta così praticamente inalterato rispetto al caso di impatto senza "cuscino". Già a distanza di qualche decina di metri, l'ampiezza di vibrazione risulta così inalterata. Ciò non di meno la pratica d'interposizione del "cuscino" di smorzamento è raccomandabile soprattutto quando i recettori sono nelle immediate vicinanze, per la minimizzazione dei rischi di scivo-



lamento dell'impalcato verso un recettore a valle così come per il contenimento del lancio di frammenti di calcestruzzo frantumati per l'impatto al suolo.

## Conclusioni

Dall'analisi ed elaborazione statistica delle misure di velocità di vibrazioni indotte dall'impatto al suolo di gravi di grosse dimensioni (tra 80 e 450 tonnellate) per altezze da 6 a 45 metri, è stato possibile stabilire, con un buon margine d'approssimazione (coefficiente di correlazione  $R = 0,83$ ), la funzione matematica che esprime il valore della velocità massima di vibrazione indotta dall'impatto al suolo di gravi, al variare della distanza, della massa e dell'altezza di questi. Questo consente al progettista di disporre di uno strumento affidabile per la verifica preventiva del rispetto dei limiti di sicurezza che la normativa impone, per la garanzia totale di non insorgenza danni e di disagio ai residenti. ■

**8. FFT dei treni d'onda delle onde sismiche per l'impatto al suolo dell'impalcato, di cui alla fig. 5**

**9. Impalcato abbattuto al suolo con salvaguardia della integrità strutturale delle pile**

**3.** Alcune centinaia di millesimi di secondo



### Riferimenti Normativi

- DIN 4150-1, 2001, *Erschütterungen im Bauwesen - Teil 1: Voremittlung von Schwingungsgrößen*
- DIN 4150-3, 1999, *Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen im baulichen Anlagen* (Le vibrazioni nelle costruzioni - parte 3: Effetti sui manufatti)
- ISEE - *Field practice guidelines for blasting seismographs*, 2009