



OGS

Istituto Nazionale
di Oceanografia
e di Geofisica
Sperimentale

Centro di Ricerche Sismologiche

**Confronto tra le registrazioni di un
terremoto effettuate da accelerometri
Kinematics EpiSensor (force balance)
e ADEL ASX2000 (MEMS) presso due
stazioni della Rete Accelerometrica
Nazionale**

Autori

Pier Luigi Bragato, Giorgio Capotosti, Piero Ziani

Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS

Venezia, 1 aprile 2026

Indice

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduzione | 4 |
| 2. Caratteristiche dei siti e della strumentazione..... | 5 |
| 3. Confronto tra le registrazioni del terremoto di Moggio Udinese del 19 marzo 2026.... | 8 |
| 3.1 Confronto PON-FX01 canale HNE | 10 |
| 3.2 Confronto PON-FX01 canale HNN | 14 |
| 3.3 Confronto PON-FX01 canale HNZ | 18 |
| 3.4 Confronto OVAR-FX02 canale HNE | 22 |
| 3.5 Confronto OVAR-FX02 canale HNN | 26 |
| 3.6 Confronto OVAR-FX02 canale HNZ | 30 |
| 4. Conclusioni..... | 34 |

1. Introduzione

Le reti accelerometriche sono uno strumento indispensabile per lo studio della propagazione del moto del suolo e dell'impatto dello scuotimento sulle strutture a seguito di forti terremoti, con installazioni di sensori effettuate sia in campo aperto che all'interno di edifici. La strumentazione in questo settore ha raggiunto elevati livelli di precisione, robustezza e affidabilità, con accelerometri realizzati prevalentemente con tecnologia "force balance", uno standard ormai affermato da diversi decenni. Negli ultimi anni lo sviluppo di accelerometri a più basso costo realizzati con tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) ha permesso di infittire le reti di monitoraggio con strumenti di minore precisione ma comunque utili a fornire informazioni supplementari per gli studi sismologici ed ingegneristici. Seppure la qualità dei sismometri MEMS sia stata dimostrata in vari test di laboratorio, rimane il dubbio se le caratteristiche nominali dello strumento valgano anche nel caso effettivo di un terremoto registrato in situazioni reali di impiego (p.e. all'interno di edifici). Allo scopo l'OGS ha avviato alcuni test mediante l'installazione di accelerometri MEMS del tipo ADEL ASX2000 co-locati con accelerometri force balance Kinematics EpiSensor, considerati tra i migliori in commercio. Nello specifico, le installazioni sono state effettuate presso le due stazioni della Rete Accelerometrica Nazionale di Ovaro (codice OVAR) e Pontebba (codice PON), entrambe in provincia di Udine. Sono state confrontate registrazioni acquisite ed elaborate dall'OGS per quel che riguarda gli ASX2000, mentre per gli EpiSensor sono state utilizzate registrazioni scaricate dal sito della RAN (<https://ran.protezionecivile.it>), acquisite ed elaborate interamente presso il Dipartimento della Protezione Civile. Come indicato nel seguito, presso l'OGS è stata effettuata la sola conversione dell'unità di misura da cm/s^2 a g (g accelerazione di gravità) e, per il calcolo della funzione di correlazione tra segnali corrispondenti, un sovracampionamento a 1000 campioni al secondo a partire dai 200 originali. I confronti qui riportati si riferiscono alle registrazioni del terremoto di Moggio Udinese del 19 marzo 2026 alle ore 10:28:59 UTC (11:28:59 locali) di magnitudo 3.9, localizzato ad una profondità di 15 km (facciamo qui riferimento ai dati pubblicati presso il sito della RAN), con epicentro rispettivamente a 25 km da OVAR e 14 km da PON (distanza ipocentrale rispettivamente 29 e 20 km)

Nel seguito verranno illustrate le caratteristiche delle stazioni per poi passare a un confronto delle registrazioni dei canali corrispondenti dei due sensori co-installati (componenti nord-sud, est-ovest e verticale). Il confronto riguarderà il picco di accelerazione e la funzione di correlazione tra coppie di segnali, utile a valutare il grado di somiglianza delle tracce nonché la qualità della sincronizzazione dei diversi acquisitori.

2. Caratteristiche dei siti e della strumentazione

La stazione della RAN a Ovaro (OVAR) è alloggiata all'interno di un magazzino comunale adibito al deposito di materiale e mezzi della Protezione Civile (in Fig. 1 la scheda tratta dal sito web della RAN comprendente alcune foto), con l'accelerografo Kinematics Obsidian fissato a terra in un angolo. Il dispositivo integra un sistema di acquisizione e un sensore accelerometrico triassiale Kinematics EpiSensor con fondo scala $\pm 2g$, guadagno 2.5 V/g, campionamento a 200 sps e sincronizzazione con segnale GPS. Ad esso è stato affiancato un accelerografo ADEL ASX2000 (Fig. 2) equipaggiato con accelerometro MEMS con uscita digitale alla risoluzione di 1.95 $\mu g/\text{count}$, anch'esso sincronizzato con segnale GPS. Entrambi gli accelerografi sono fissati a pavimento con tasselli. Al nuovo dispositivo è stato attribuito il codice di stazione FX02.

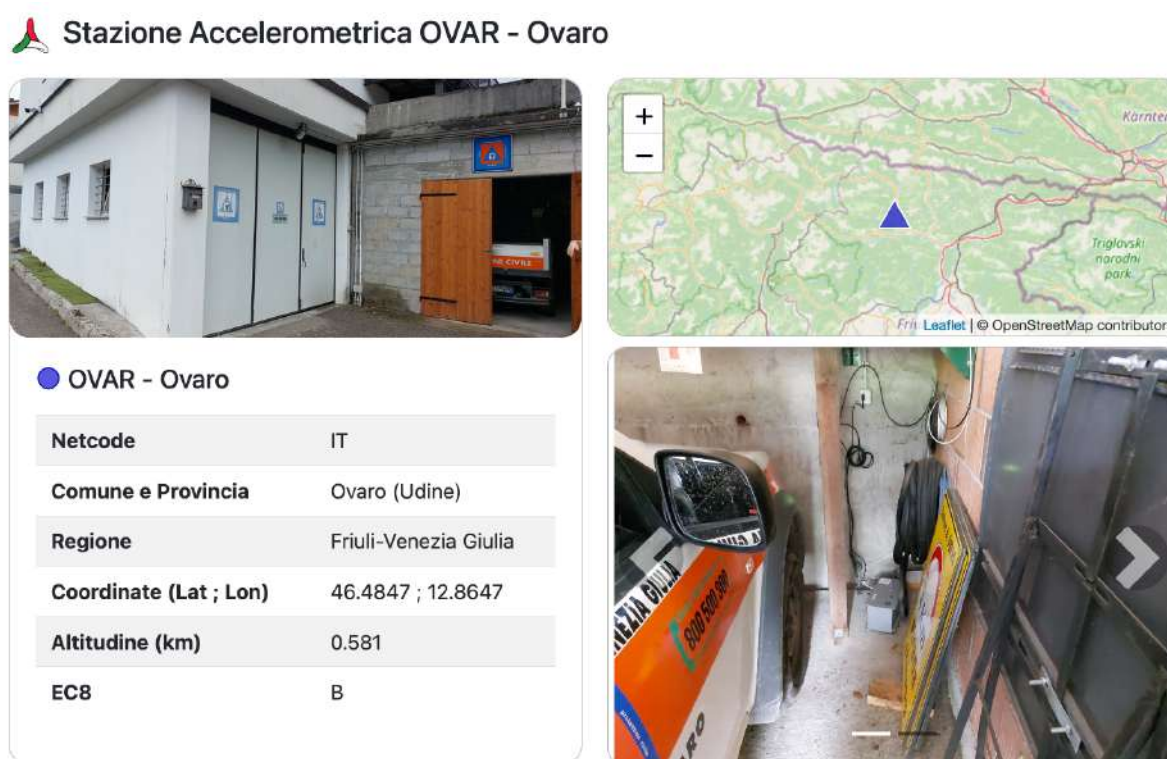


Figura 1. Scheda della stazione accelerometrica di Ovaro in provincia di Udine (codice OVAR) tratta dal sito web della RAN. La foto in basso a dx mostra l'accelerografo Kinematics Obsidian dotato di sensore accelerometrico triassiale Kinematics EpiSensor.

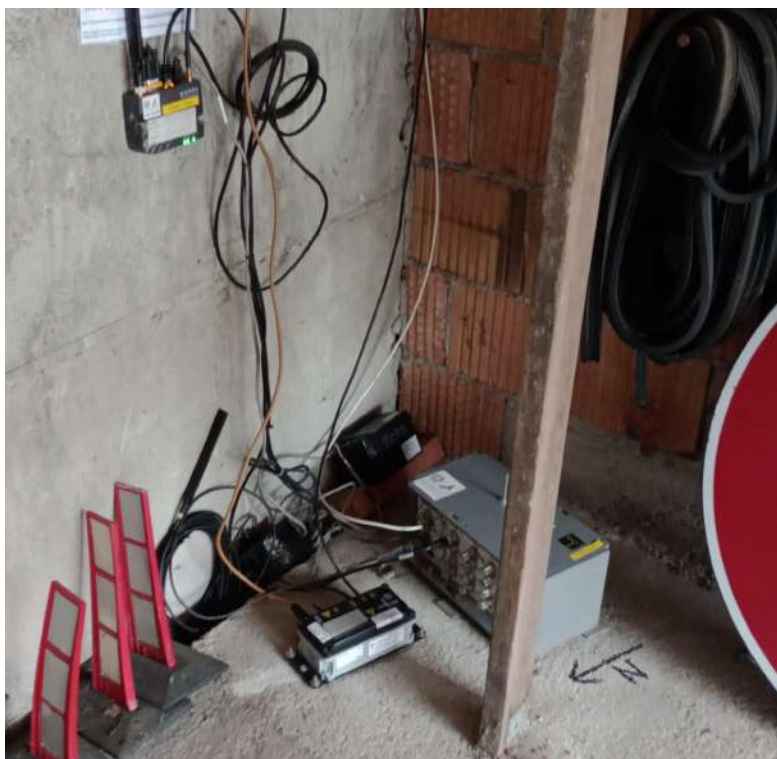
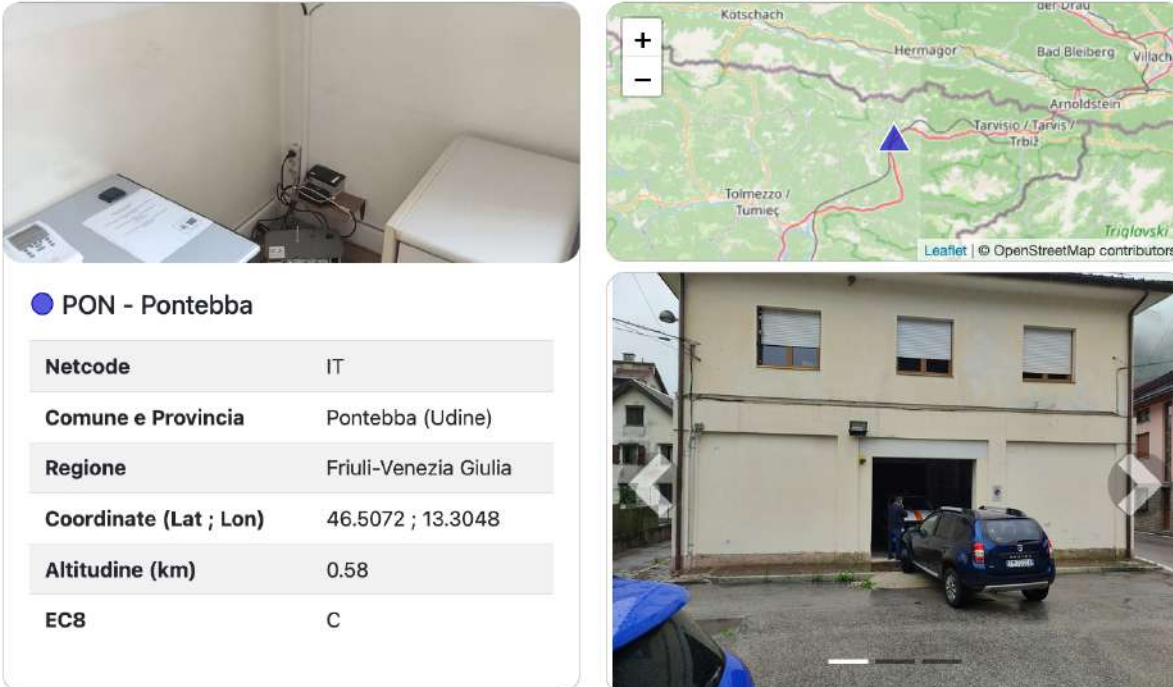


Figura 2. Accelerografo ADEL ASX2000 (scatola piccola a sx, codice stazione FX02) installato a fianco dell'accelerografo Kinematics Obsidian di Ovaro (codice stazione OVAR).

La stazione RAN di Pontebba (PON) è installata all'interno della sede della locale Protezione Civile (in Fig. 3 la scheda tratta dal sito web della RAN) ed è dotata della stessa strumentazione di Ovaro (accelerografo Kinematics Obsidian, sensore accelerometrico triassiale Kinematics EpiSensor con fondo scala $\pm 2g$, guadagno $2.5 V/g$, campionamento a 200 sps, sincronizzazione GPS). Anche qui è stato affiancato un accelerografo ADEL ASX2000 con codice FX01 (Fig. 4). Da notare che, per motivi logistici, il dispositivo è stato installato ruotato di 90° in senso antiorario rispetto allo standard, con la componente X orientata a nord (normalmente a est) e la componente Y orientata a ovest (normalmente a nord): di questa rotazione si è tenuto conto nel corso dell'elaborazione, rinominando opportunamente i canali e moltiplicando per -1 il segnale della componente orientata a ovest. Per gli stessi motivi logistici, il dispositivo ASX2000 è stato fissato a terra con nastro biadesivo extra forte 3M Extreme in luogo dei normali tasselli. Inoltre, per la sincronizzazione si è adottata quella via Internet con il protocollo NTP.

Stazione Accelerometrica PON - Pontebba



| ● PON - Pontebba | |
|------------------------|-----------------------|
| Netcode | IT |
| Comune e Provincia | Pontebba (Udine) |
| Regione | Friuli-Venezia Giulia |
| Coordinate (Lat ; Lon) | 46.5072 ; 13.3048 |
| Altitudine (km) | 0.58 |
| ECB | C |

Figura 3. Scheda della stazione accelerometrica di Pontebba in provincia di Udine (codice PON) tratta dal sito web della RAN. La foto in alto a sinistra mostra l'accelerografo Kinematics Obsidian dotato di sensore accelerometrico triassiale Kinematics EpiSensor.



Figura 4. Accelerografo ADEL ASX2000 (scatola piccola a dx, codice stazione FX01) installato a fianco dell'accelerografo Kinematics Obsidian di Pontebba (codice stazione PON).

3. Confronto tra le registrazioni del terremoto di Moggio Udinese del 19 marzo 2026

I confronti tra le registrazioni sono stati effettuati per ciascuna coppia di canali in maniera grafica (Figs. 5-28) e in maniera parametrica in (Tab. 1). In particolare, nelle figure vengono proposti il confronto tra i due segnali completi, la relativa funzione di correlazione, e il confronto tra le corrispondenti fasi P ed S del segnale. Preliminarmente al confronto, i segnali sono stati opportunamente moltiplicati per esprimere tutte le accelerazioni in g (g accelerazione di gravità). Inoltre, i canali orizzontali della stazione FX01 (ASX200 installato a Pontebba) sono stati ruotati per ricondurli alle direzioni standard, con verso positivo rispettivamente in direzione est e nord. Come ulteriore passaggio di elaborazione, è stato effettuato un sovra campionamento con interpolazione a 1000 sps per tutti i segnali, ciò al fine di uniformare il sampling rate (200 sps per gli EpiSensor, 250 sps per gli ASX2000). L'operazione è stata effettuata utilizzando la funzione "interpolate" del software SAC (semplice chiamata "interpolate delta 0.001", senza ulteriori parametri).

Le Figs. 5-28 mostrano una buona corrispondenza dei segnali con massimo della funzione di correlazione (riportata sia nelle figure che in Tab.1) compreso tra 0.93 per la coppia di segnali più deboli (componenti verticali di Ovaro, con valori di picco inferiori a 0.002 g) e 0.99 per tutte le registrazioni effettuate a Pontebba (tutti valori superiori a 0.1 g). Considerando le diverse porzioni del segnale (Figs. 5-28 e colonne "correl." in Tab. 1), il valore della correlazione è sempre più elevato in corrispondenza alla fase S, la più energetica e caratterizzata da un più elevato rapporto segnale/ rumore elettronico dello strumento: 0.99 in tutti i casi, tranne che per le componenti verticali di Ovaro. La funzione di correlazione permette anche di stimare il ritardo relativo dei due segnali. Per la stazione di Ovaro è di 0.001 s, a livello del passo di campionamento, il che conferma la buona qualità della sincronizzazione GPS dell'ASX2000 qui installato (codice FX02). Per l'ASX2000 installato a Pontebba (codice FX01), invece, un'analisi di correlazione preliminare ha evidenziato un ritardo di 0.465 s rispetto al corrispondente EpiSensor di PON. La differenza è imputabile ad un difetto nella sincronizzazione via NTP, problema già noto e risolto con le più recenti versioni del dispositivo. Per tutte le elaborazioni qui considerate si è utilizzato un segnale di FX01 corretto per tale ritardo (il time lag prossimo a 0 secondi indicato nelle figure è pertanto fittizio e non è stato riportato in Tab. 1). In Tab. 1 sono riportati anche i valori del picco di accelerazione (PGA) misurato sui diversi canali ed espressi in centesimi di g (%g) al fine di semplificare la notazione. Stante la diversa distanza ipocentrale (20 km per PON, 29 km per OVAR), i picchi rilevati a Pontebba sono notevolmente più elevati di quelli di

Ovaro (da quattro a cinque volte a seconda delle componenti). Di maggiore interesse per la presente sperimentazione sono le differenze tra i valori di PGA ottenuti tra coppie corrispondenti EpiSensor/ASX2000 (colonne "PGA diff." In Tab. 1): la differenza maggiore è pari a -0.051 %g (-0.00051 g), inferiore al millesimo di g, in linea con le caratteristiche di rumorosità dello strumento.

| | epi dist (km) | hypo dist (km) | HNE | | | | HNN | | | | HNZ | | | |
|-------------|---------------|----------------|----------|----------------|------------------|---------|----------|----------------|------------------|---------|----------|----------------|------------------|---------|
| | | | PGA (%g) | diff. PGA (%g) | correl. | lag (s) | PGA (%g) | diff. PGA (%g) | correl. | lag (s) | PGA (%g) | diff. PGA (%g) | correl. | lag (s) |
| PON | 14 | 20 | 1.841 | 0.009 | 0.99 | - | 1.979 | -0.051 | 0.99 | - | 1.107 | -0.038 | 0.99 | - |
| FX01 | | | 1.850 | | P 0.99 S 0.99 | | 1.928 | | P 0.99 S 0.99 | | 1.069 | | P 0.99 S 0.99 | |
| OVAR | 25 | 29 | 0.288 | -0.007 | 0.97 | 0.001 | 0.233 | 0.017 | 0.98 | 0.001 | 0.198 | -0.008 | 0.93 | 0.001 |
| FX02 | | | 0.281 | | P 0.96 S 0.99 | | 0.250 | | P 0.94 S 0.99 | | 0.190 | | P 0.95 S 0.96 | |

Tabella 1. Principali parametri del confronto tra gli accelerometri accoppiati sulle stazioni RAN di Pontebba (PON) e Ovaro (OVAR). I codici FX01 e FX02 sono quelli adottati per i dispositivi ADEL ASX200 installati temporaneamente per la sperimentazione. I valori di PGA sono espressi in centesimi di g (%g) per semplificare la notazione.

3.1 Confronto PON-FX01 canale HNE

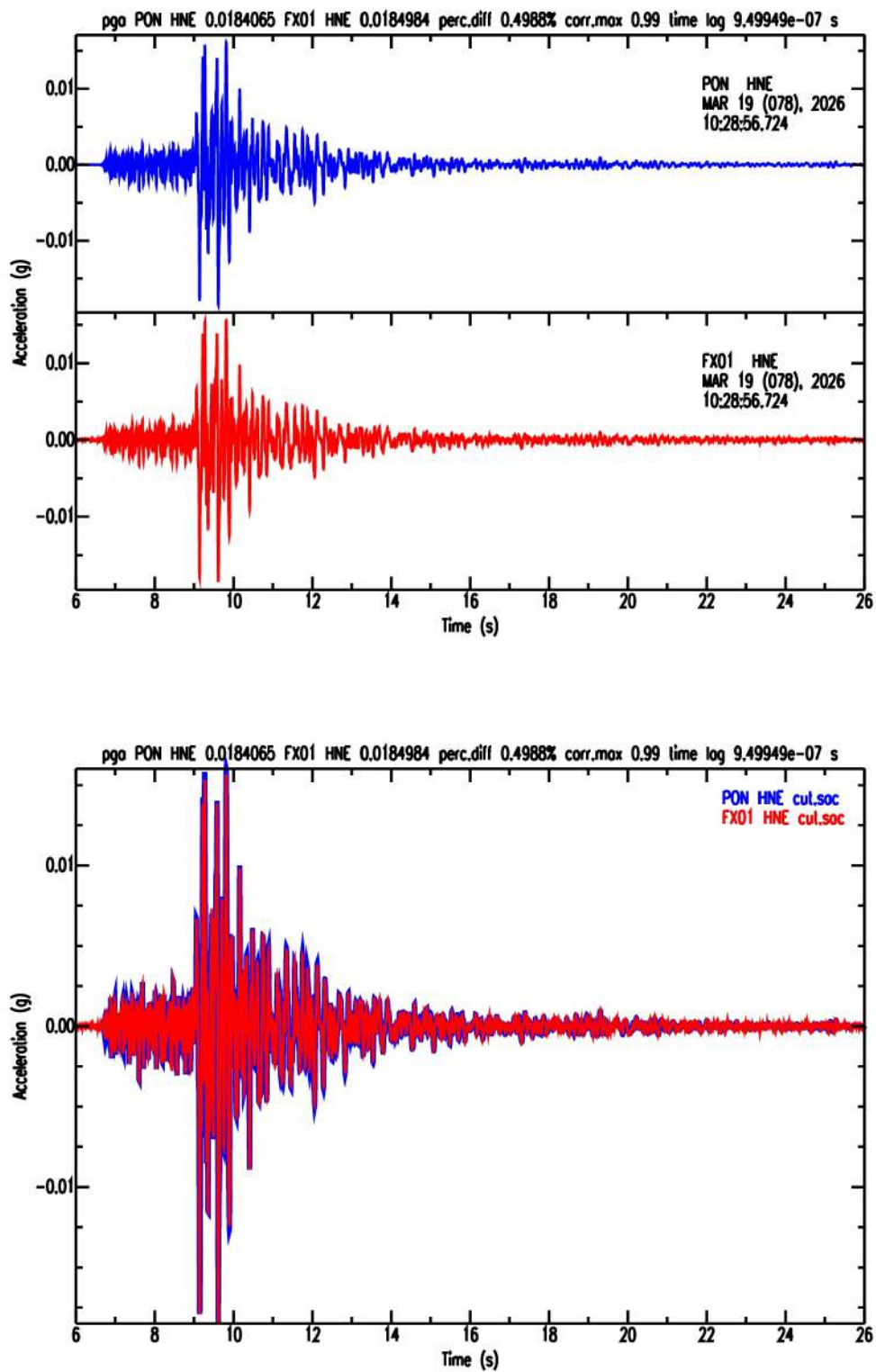


Figura 5. Confronto tra le registrazioni dei canali HNE delle stazioni PON ed FX01 (registrazione completa).

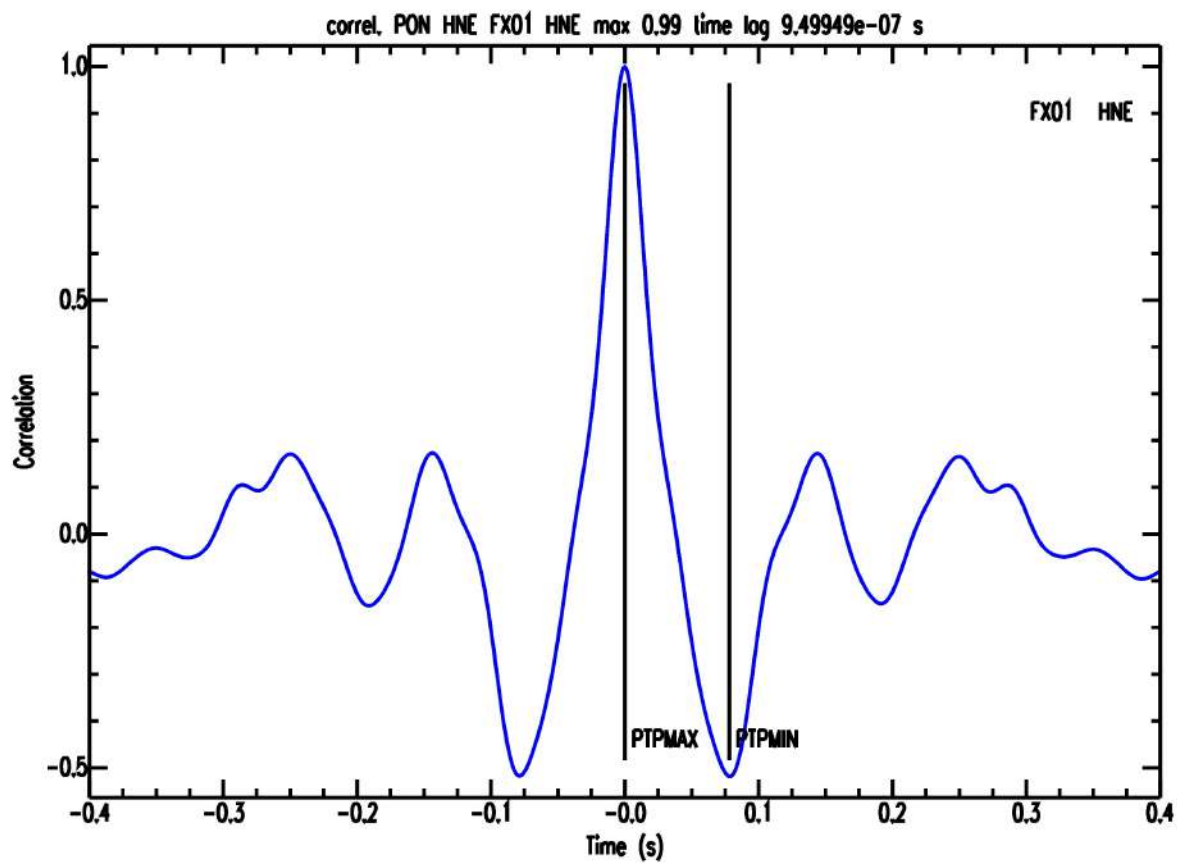


Figura 6. Funzione di cross-correlazione tra le registrazioni dei canali HNE delle stazioni PON ed FX01 (registrazione completa).

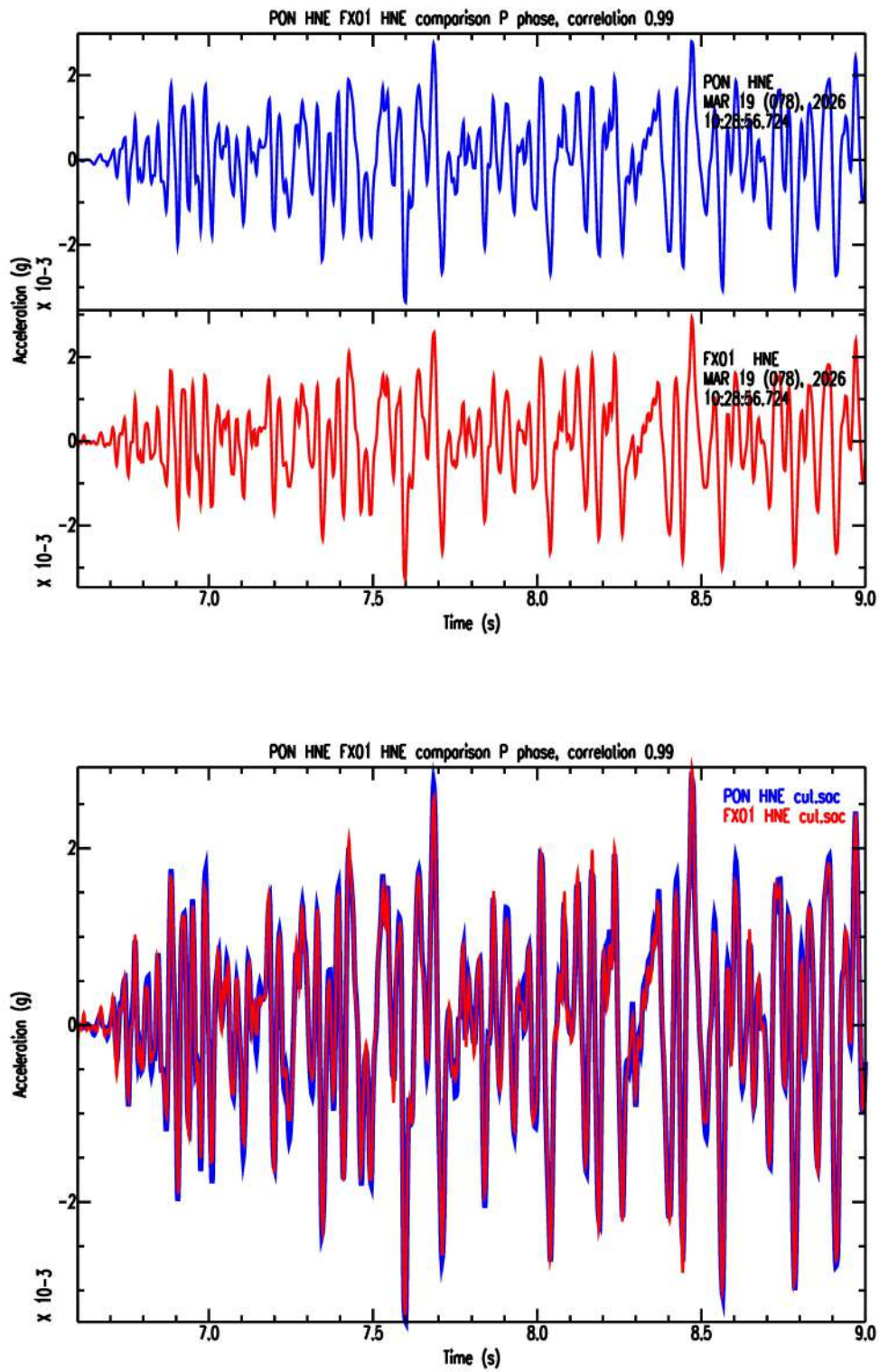


Figura 7. Confronto tra le registrazioni dei canali HNE delle stazioni PON ed FX01 per la sola fase P.

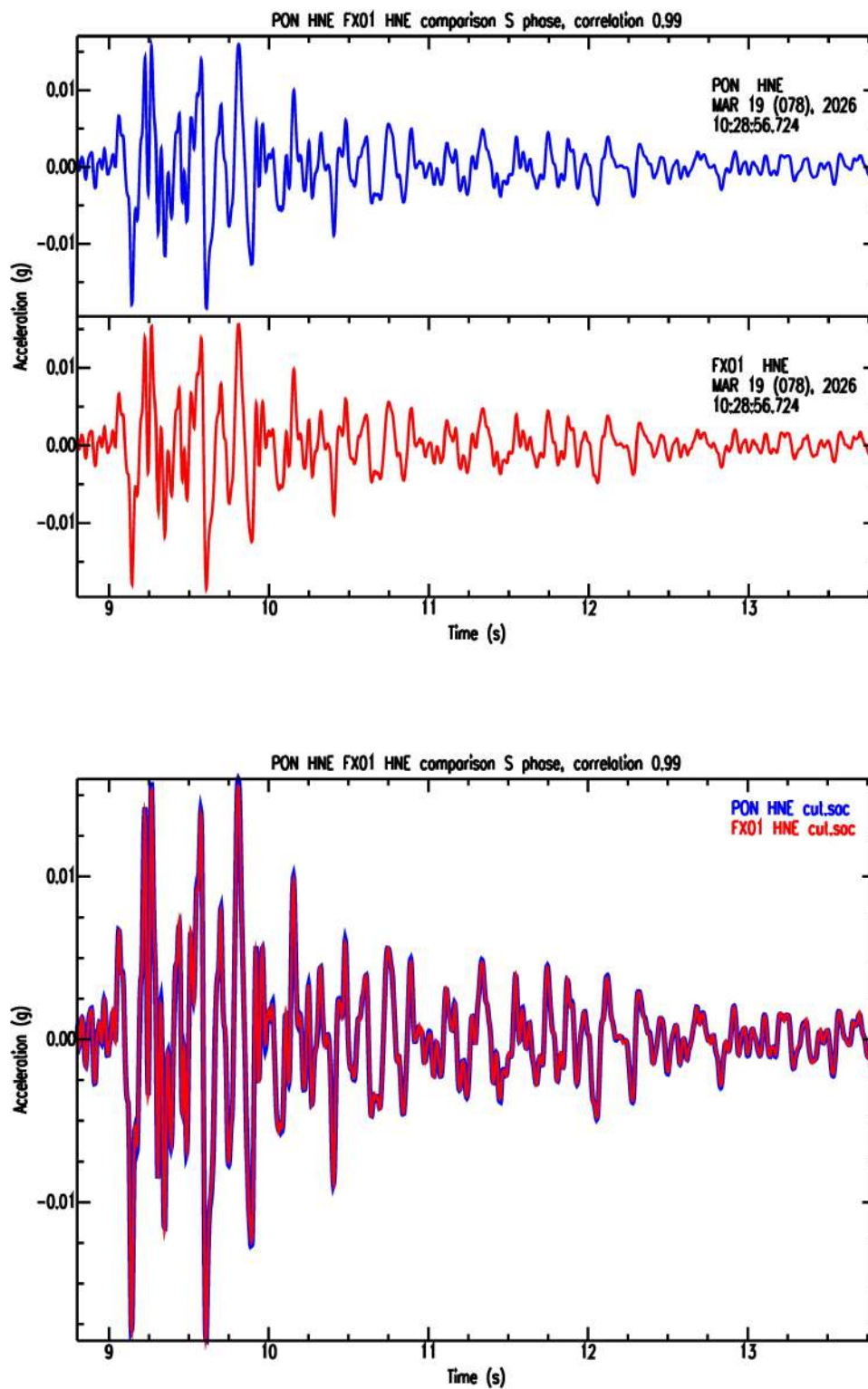


Figura 8. Confronto tra le registrazioni dei canali HNE delle stazioni PON ed FX01 per la sola fase S.

3.2 Confronto PON-FX01 canale HNN

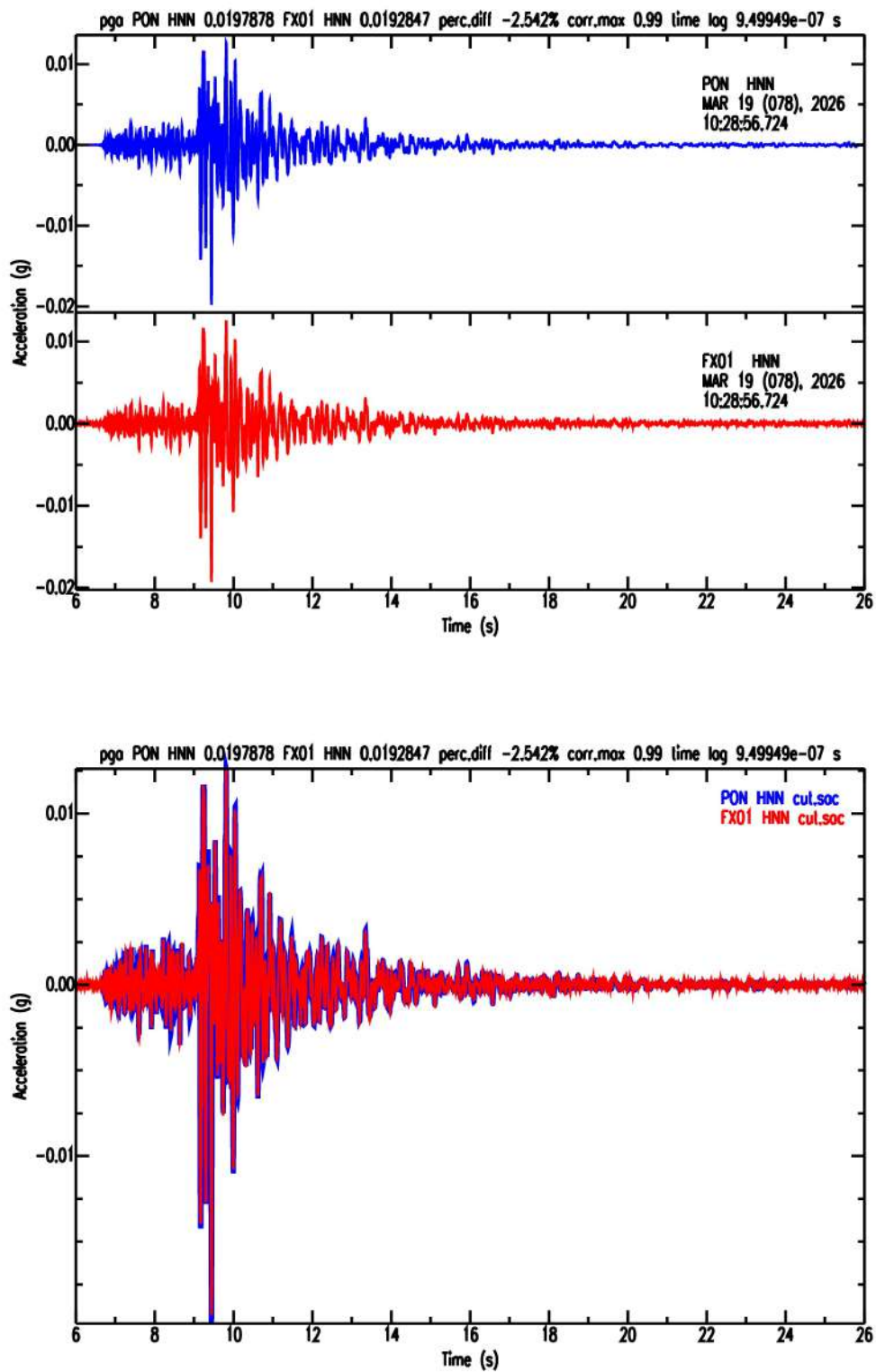


Figura 9. Confronto tra le registrazioni dei canali HNE delle stazioni PON ed FX01 (registrazione completa).

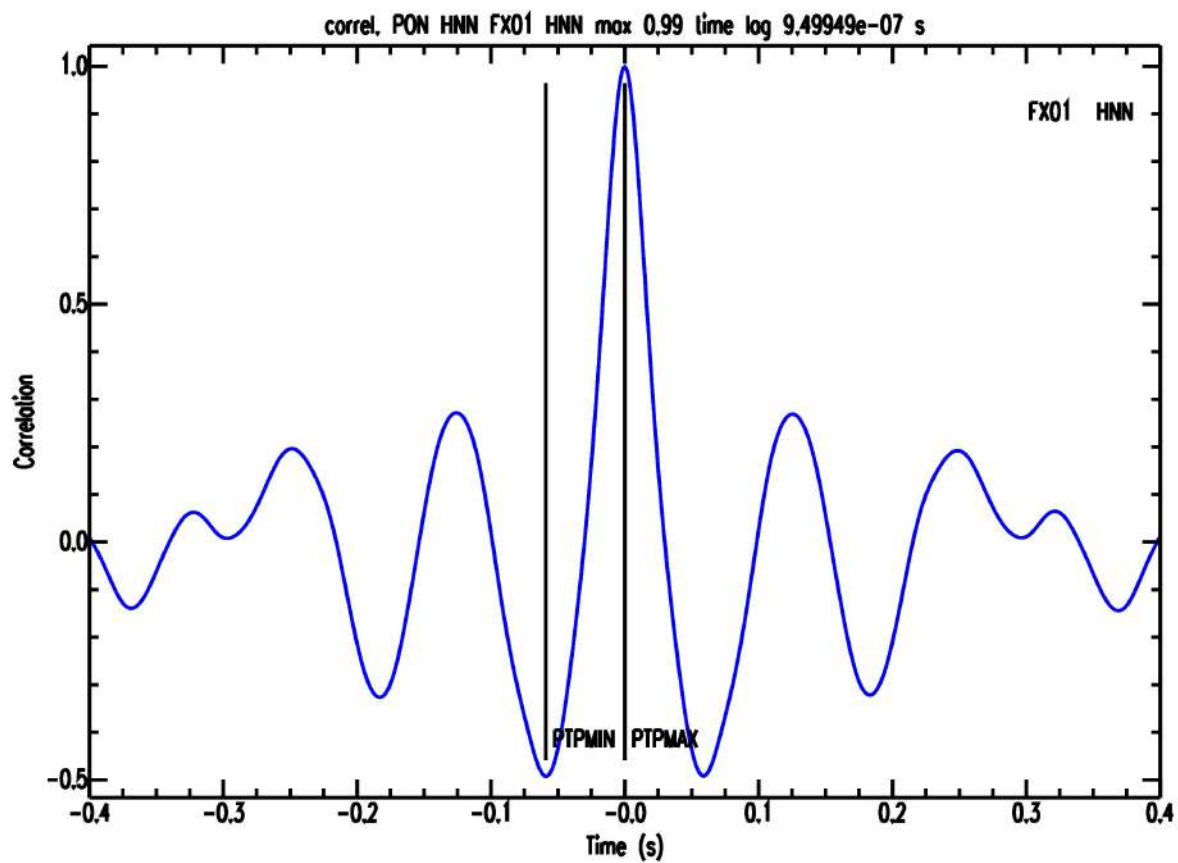


Figura 10. Funzione di cross-correlazione tra le registrazioni dei canali HNN delle stazioni PON ed FX01 (registrazione completa).

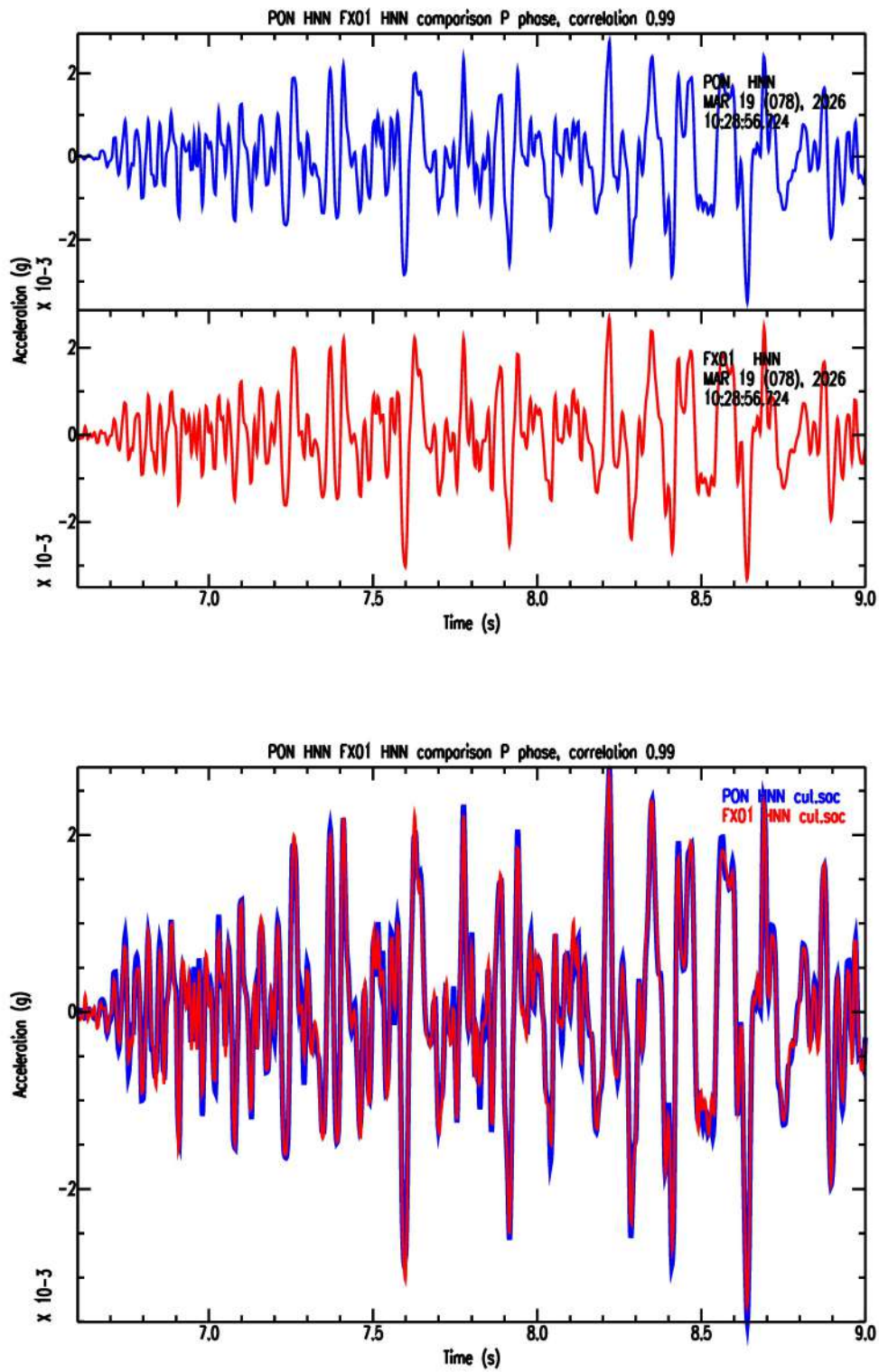


Figura 11. Confronto tra le registrazioni dei canali HNN delle stazioni PON ed FX01 per la sola fase P.

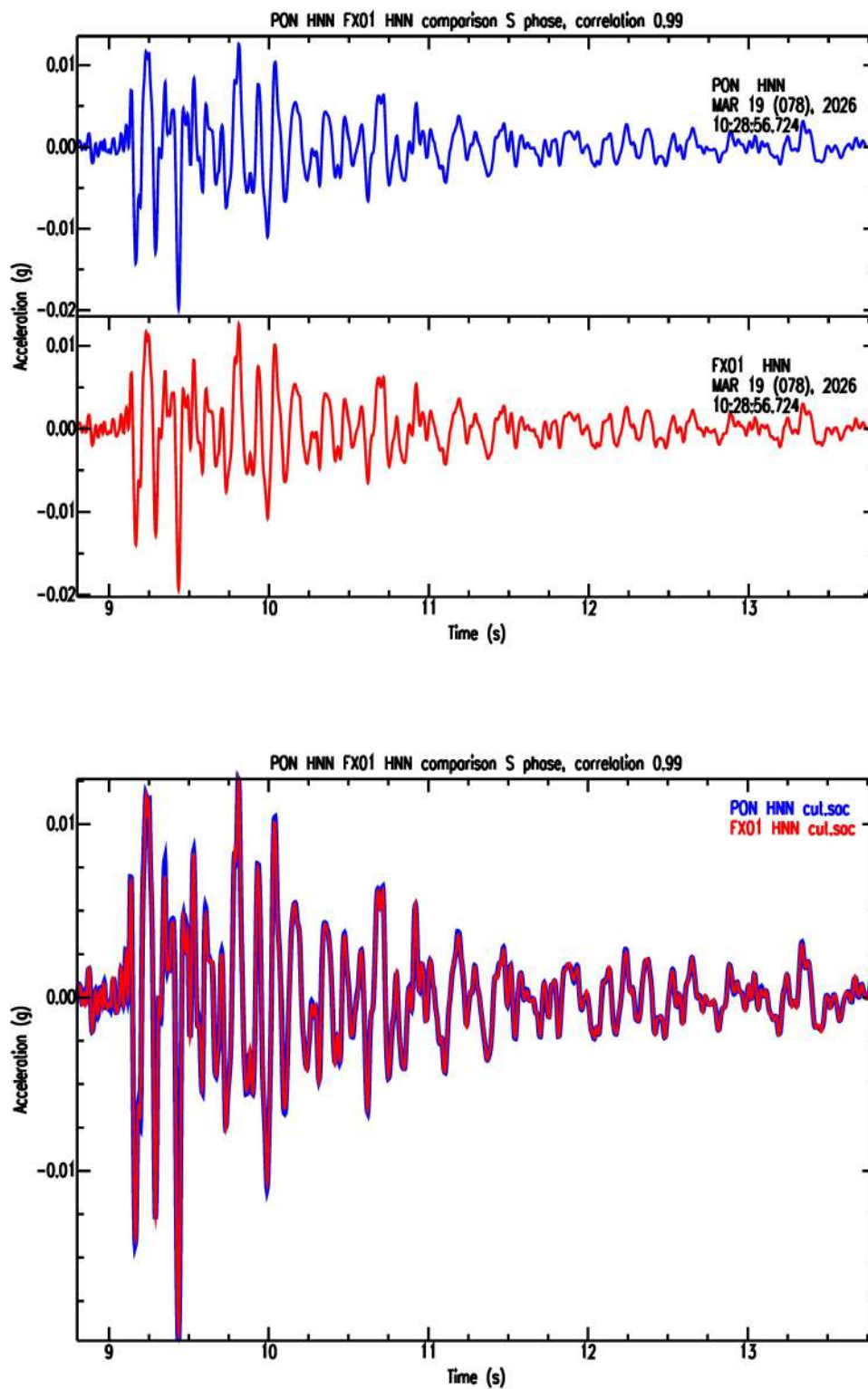


Figura 12. Confronto tra le registrazioni dei canali HNN delle stazioni PON ed FX01 per la sola fase S.

3.3 Confronto PON-FX01 canale HNZ

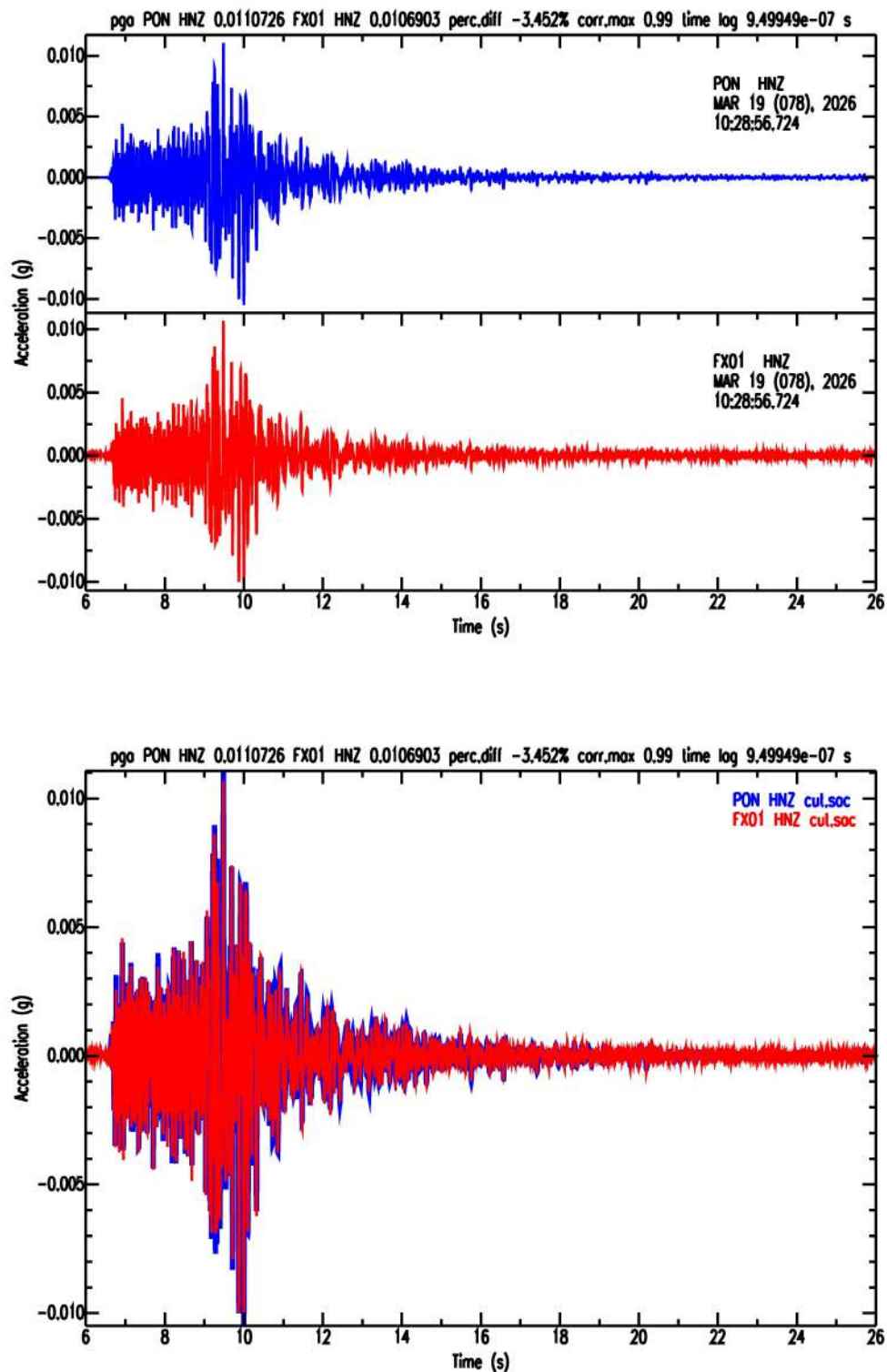


Figura 13. Confronto tra le registrazioni dei canali HNZ delle stazioni PON ed FX01 (registrazione completa).

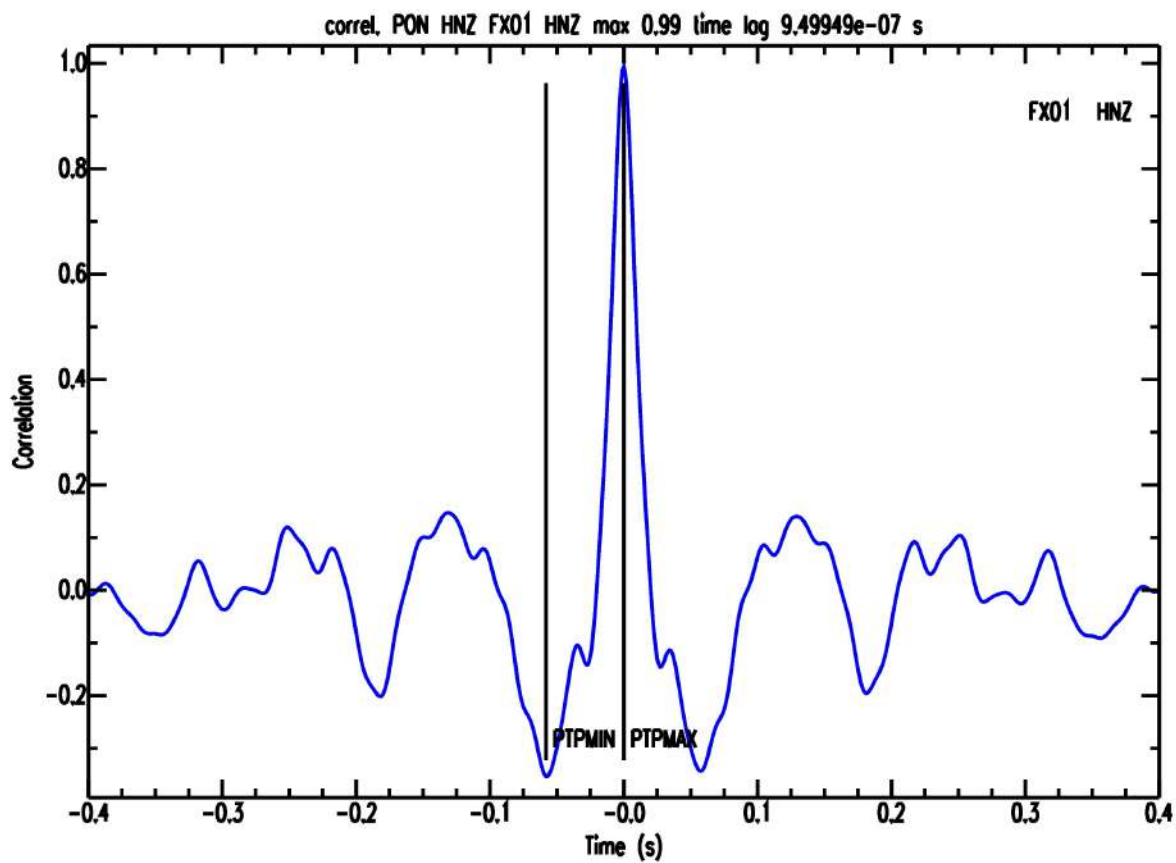


Figura 14. Funzione di cross-correlazione tra le registrazioni dei canali HNZ delle stazioni PON ed FX01 (registrazione completa).

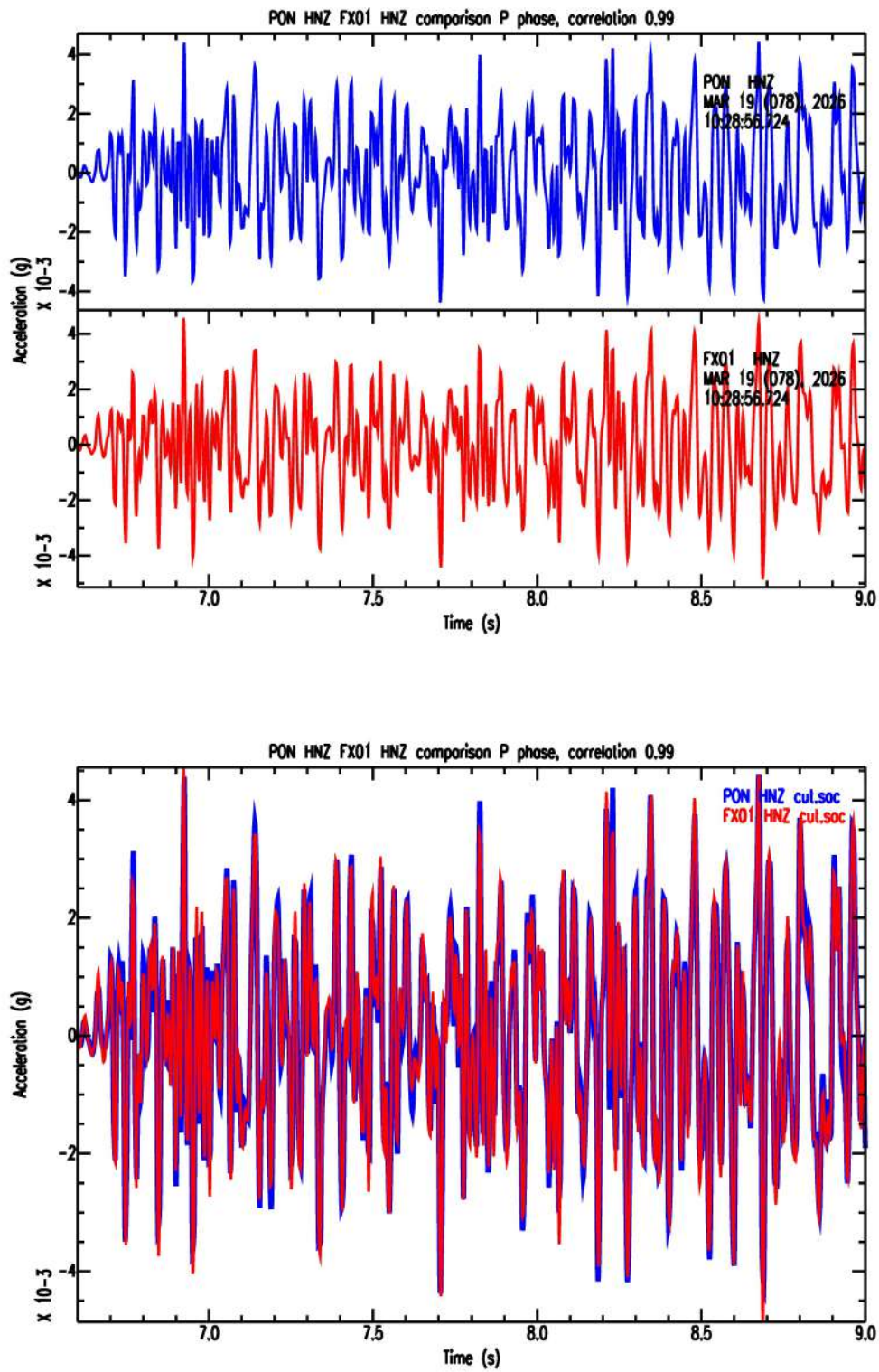


Figura 15. Confronto tra le registrazioni dei canali HNZ delle stazioni PON ed FX01 per la sola fase P.

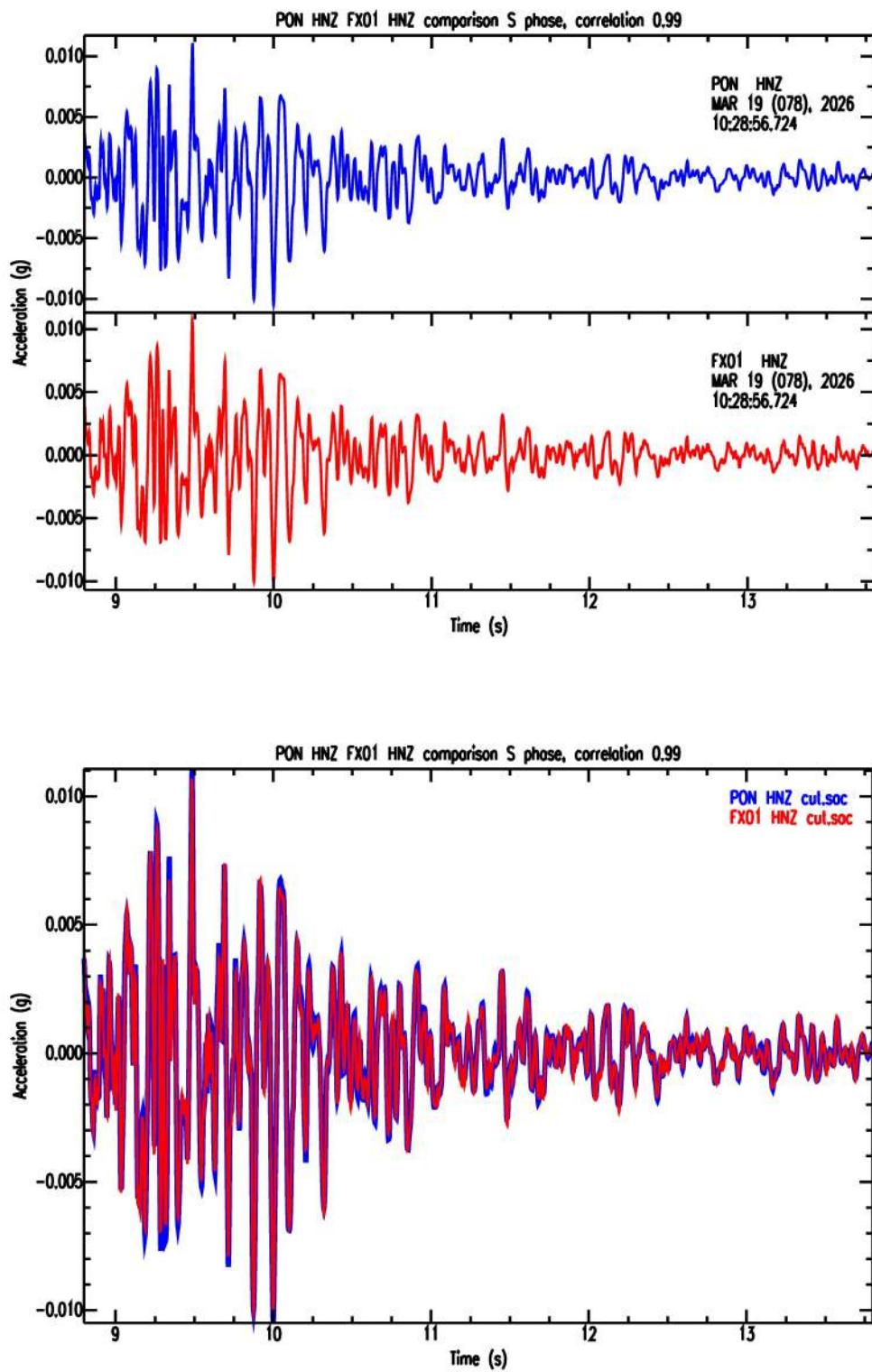


Figura 16. Confronto tra le registrazioni dei canali HNZ delle stazioni PON ed FX01 per la sola fase S.

3.4 Confronto OVAR-FX02 canale HNE

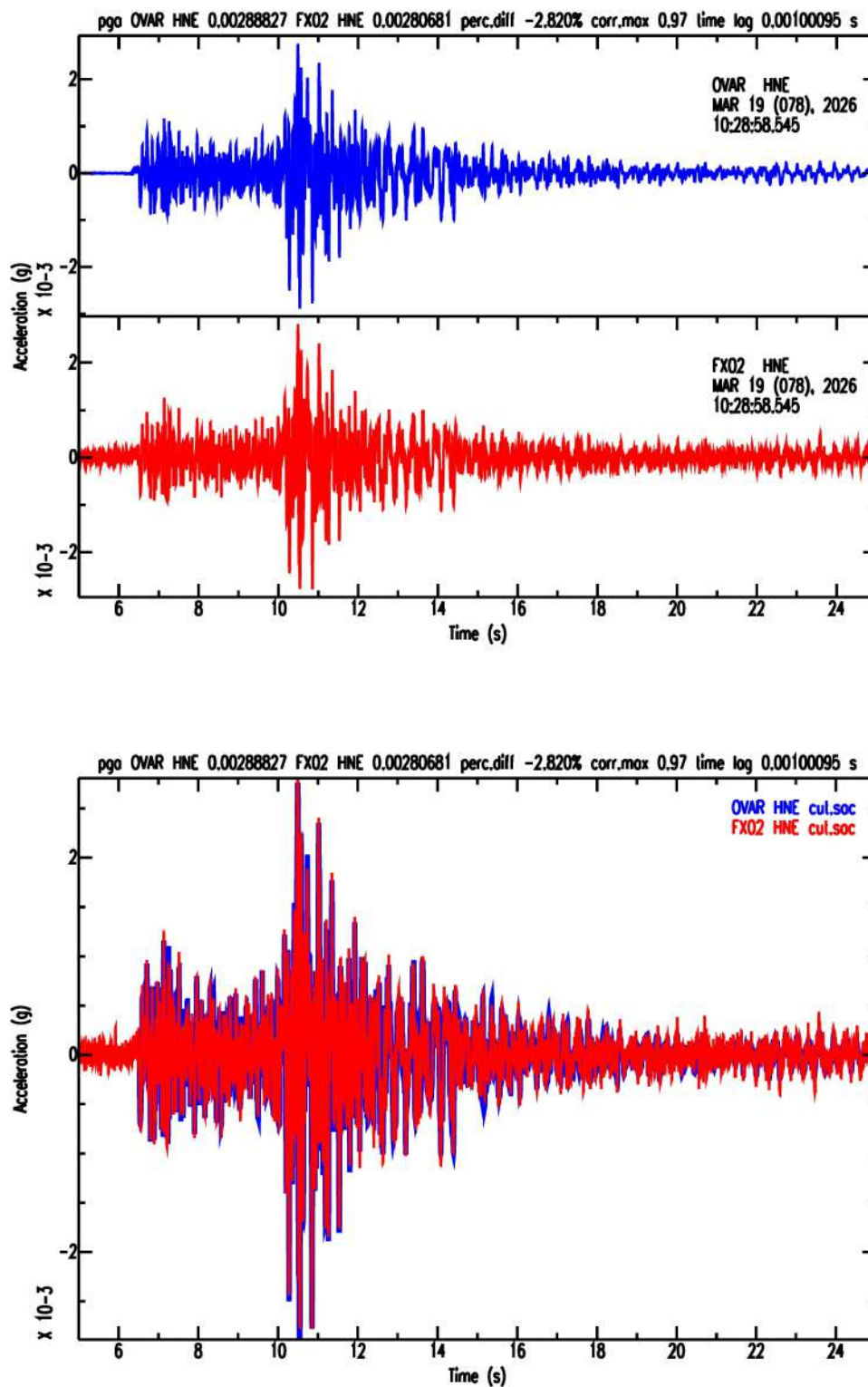


Figura 17. Confronto tra le registrazioni dei canali HNE delle stazioni OVAR ed FX02 (registrazione completa).

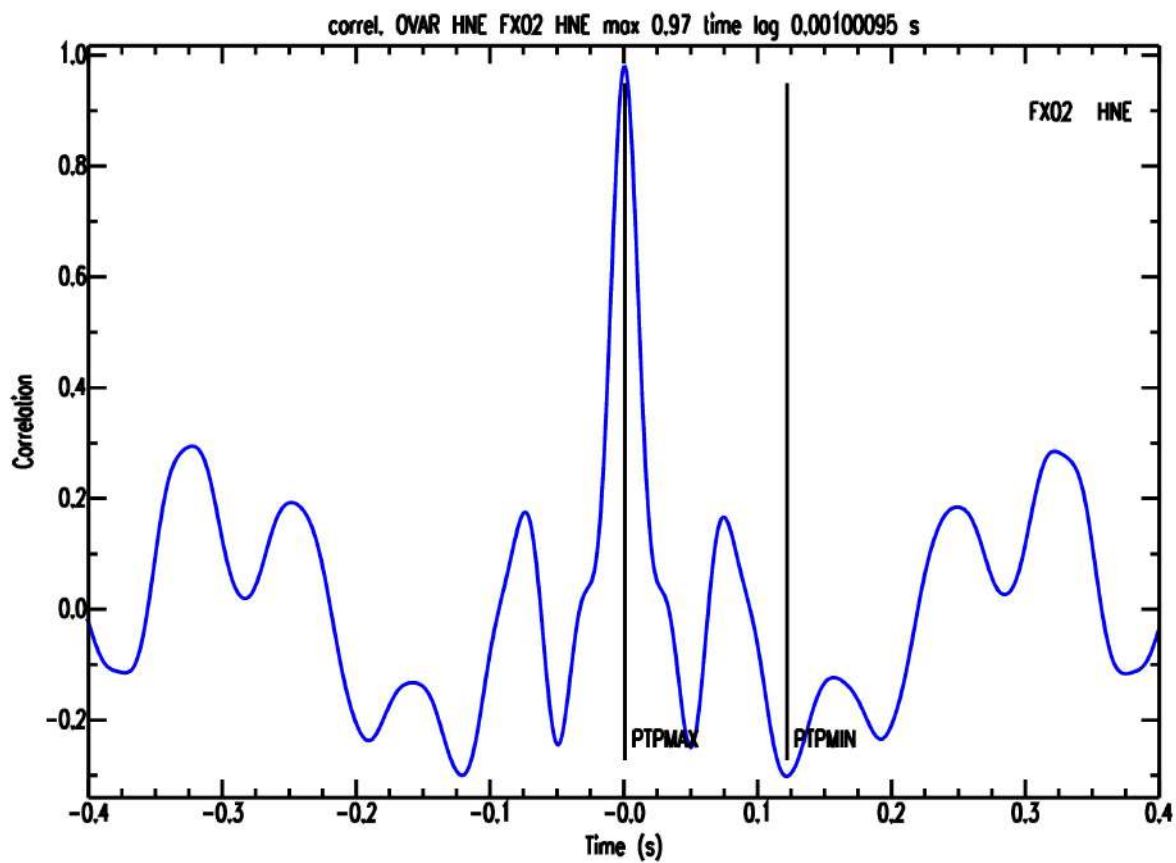


Figura 18. Funzione di cross-correlazione tra le registrazioni dei canali HNE delle stazioni OVAR ed FX02 (registrazione completa).

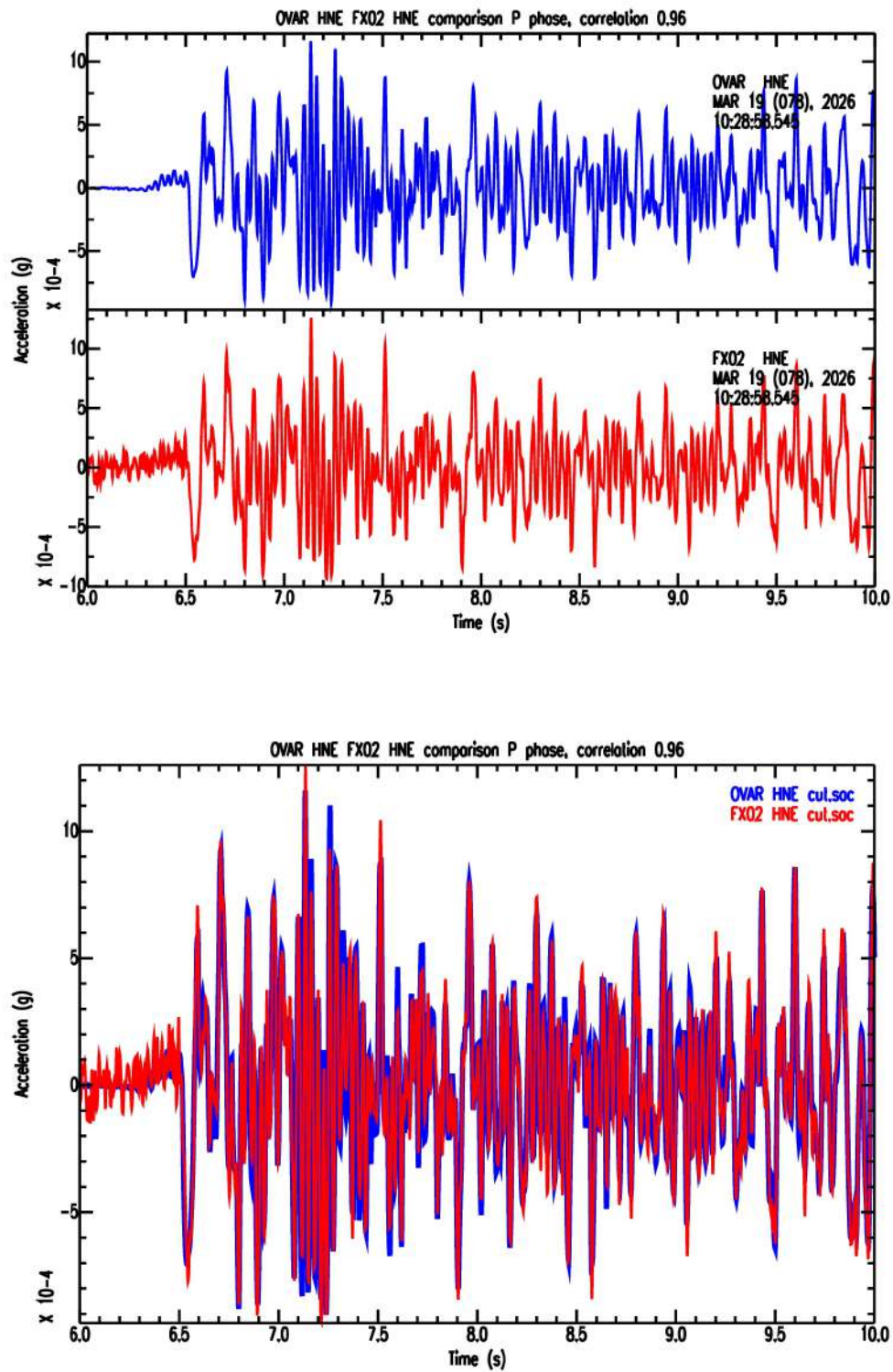


Figura 19. Confronto tra le registrazioni dei canali HNE delle stazioni OVAR ed FX02 per la sola fase P.

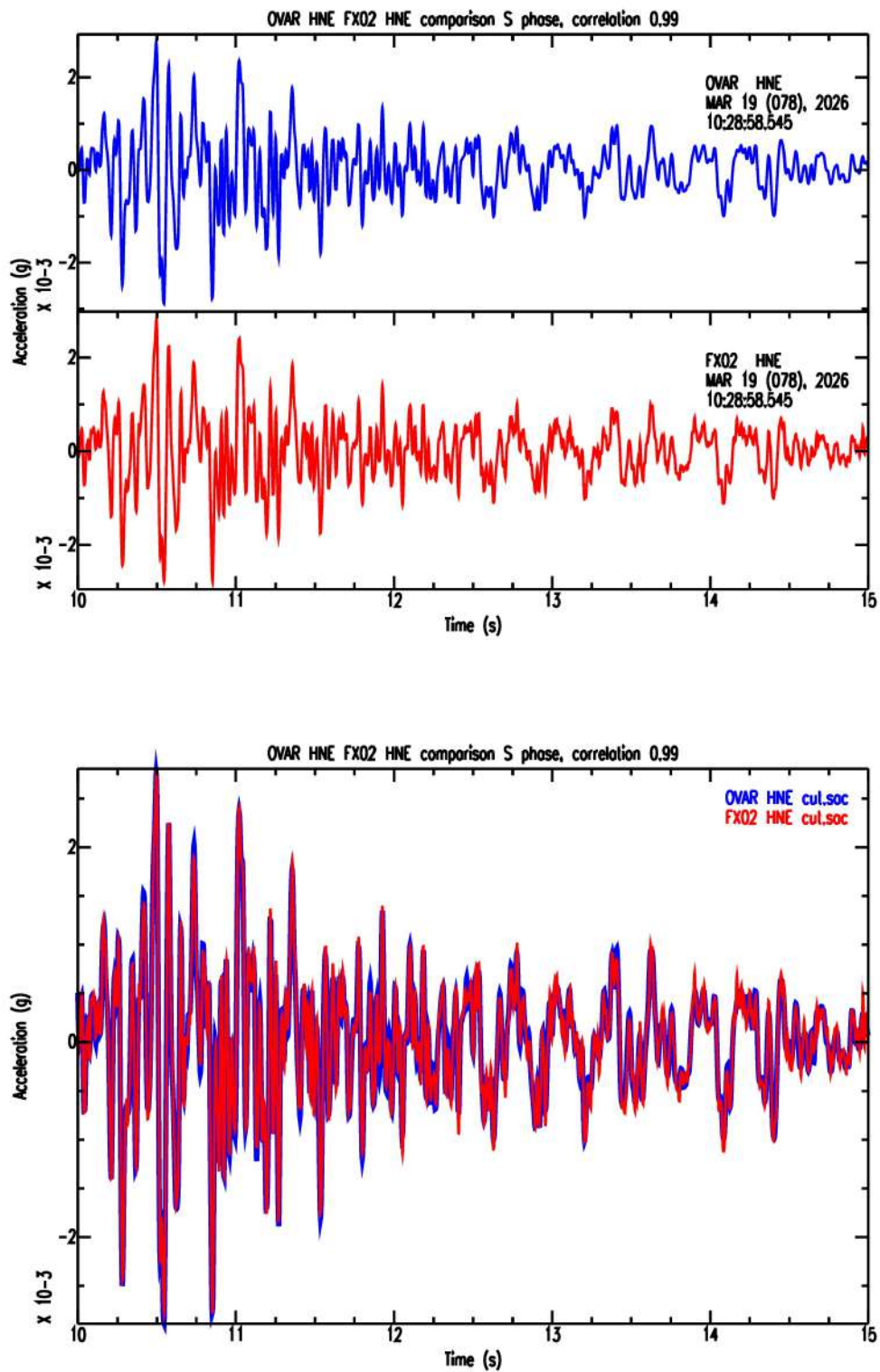


Figura 20. Confronto tra le registrazioni dei canali HNE delle stazioni OVAR e FX02 per la sola fase S.

3.5 Confronto OVAR-FX02 canale HNN

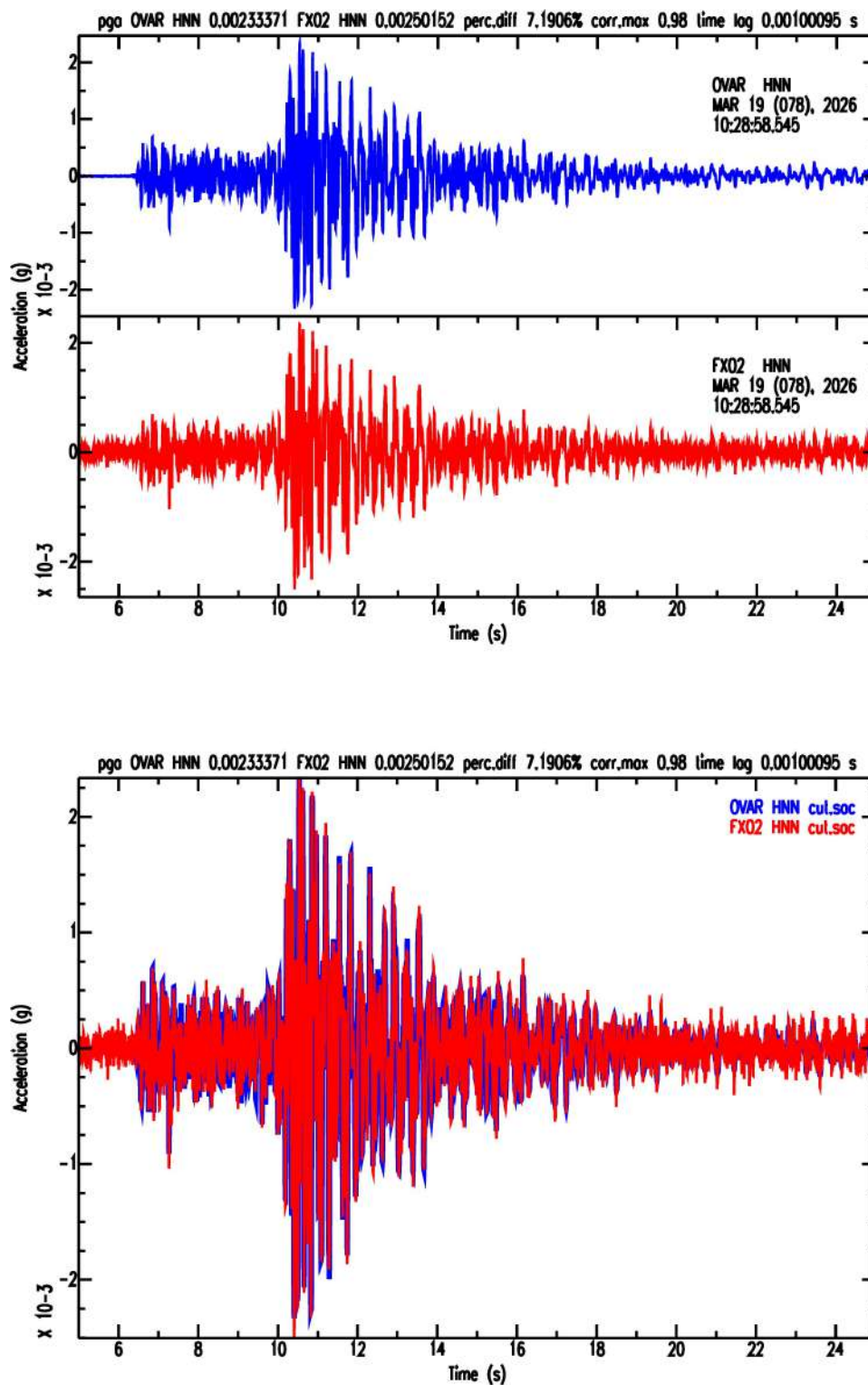


Figura 21. Confronto tra le registrazioni dei canali HNN delle stazioni OVAR ed FX02 (registrazione completa).

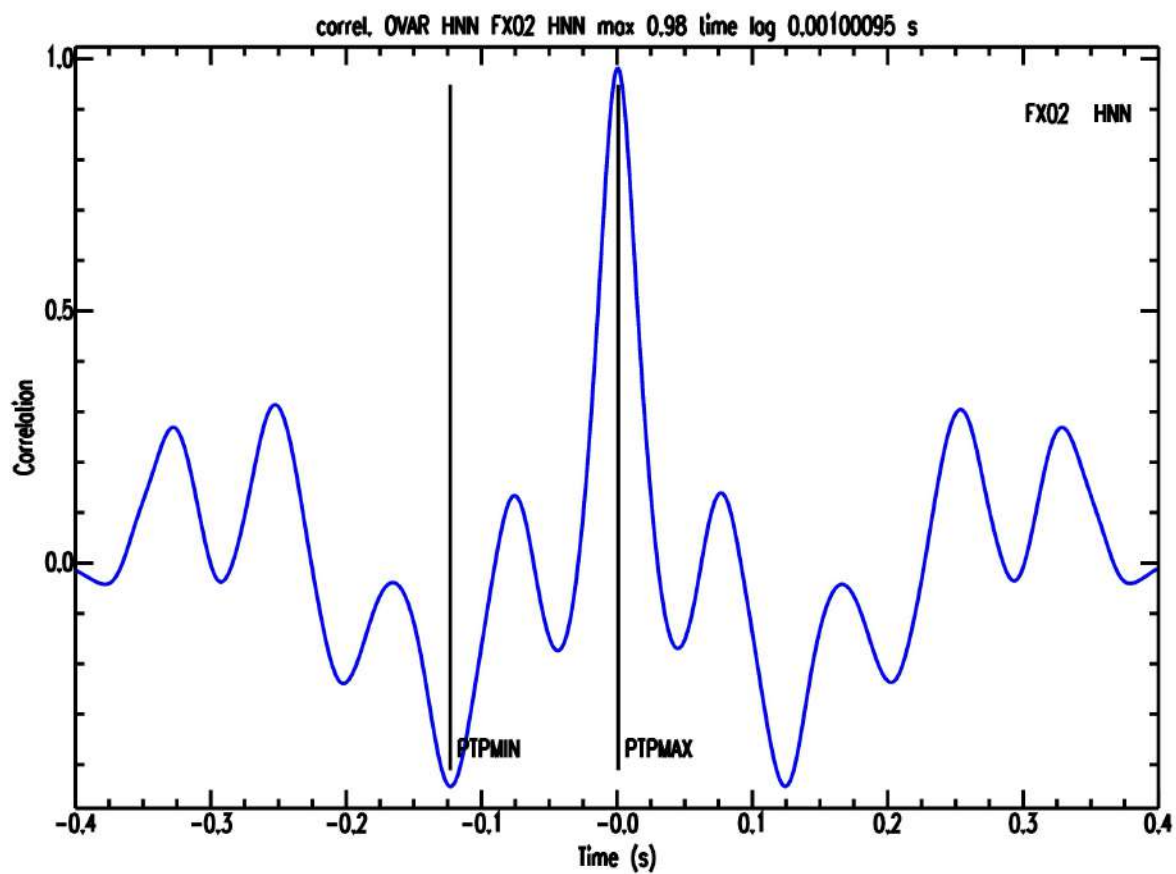


Figura 22. Funzione di cross-correlazione tra le registrazioni dei canali HNN delle stazioni OVAR ed FX02 (registrazione completa).

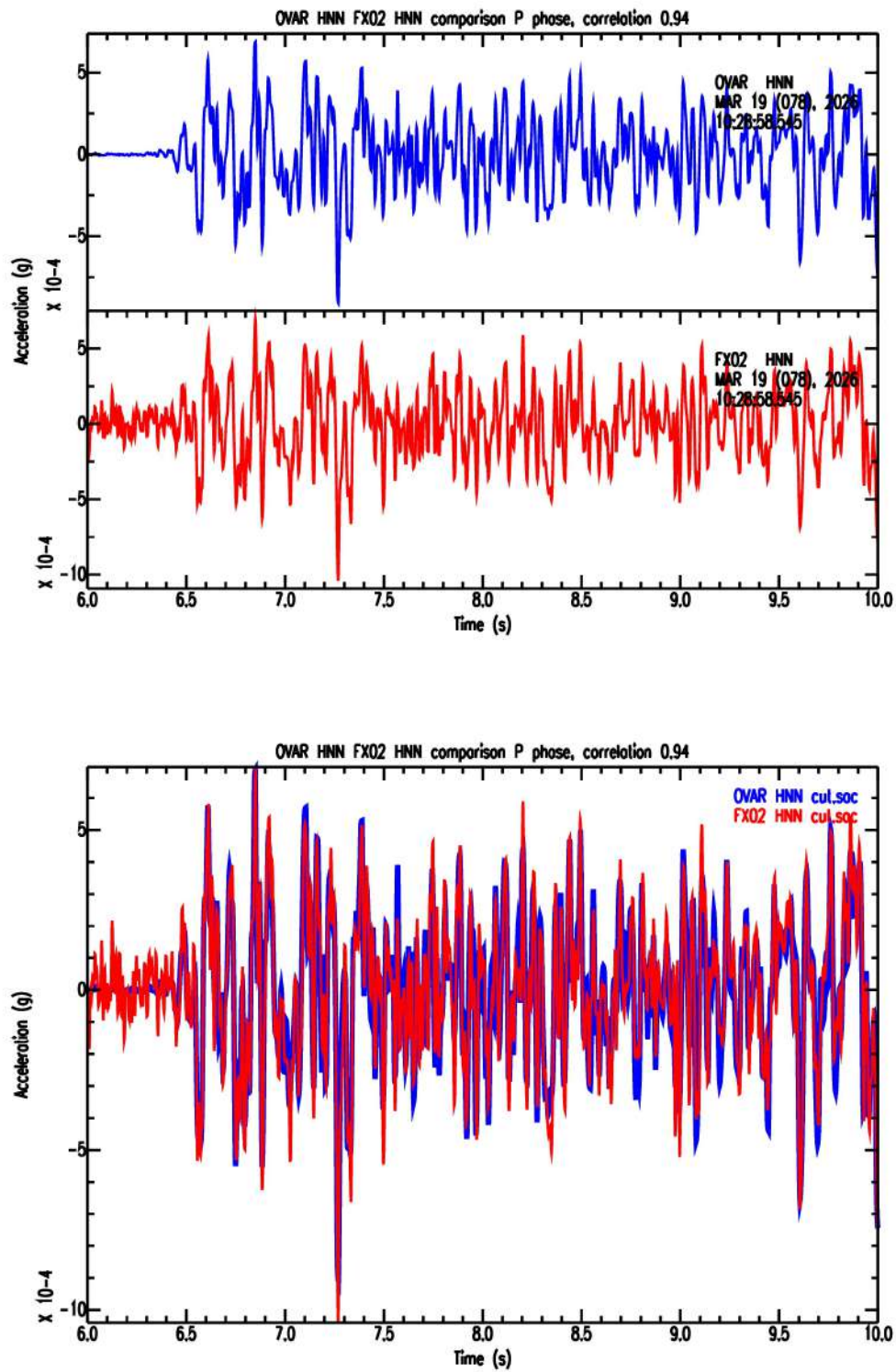


Figura 23. Confronto tra le registrazioni dei canali HNN delle stazioni OVAR ed FX02 per la sola fase P.

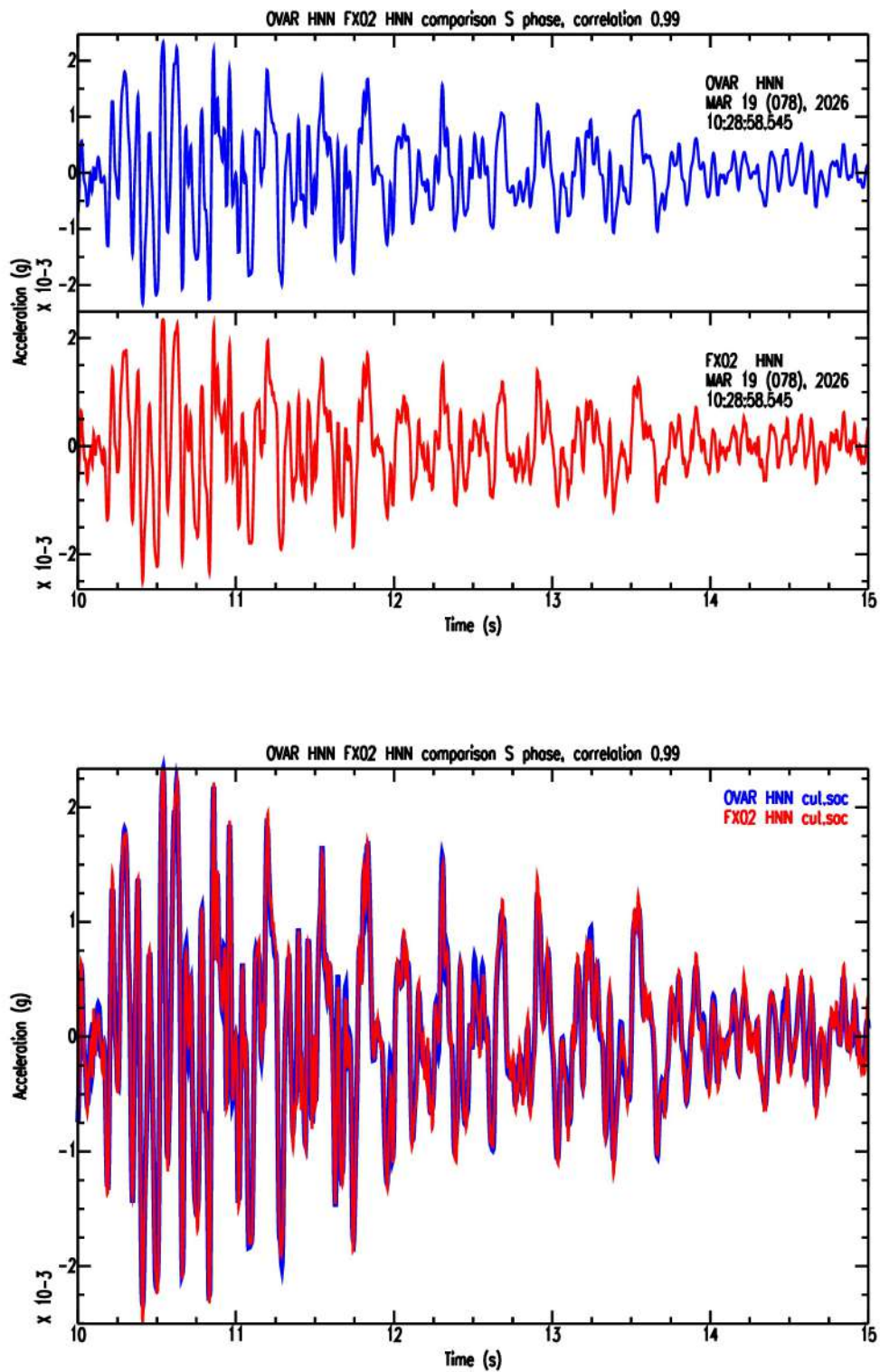


Figura 24. Confronto tra le registrazioni dei canali HNN delle stazioni OVAR e FX02 per la sola fase S.

3.6 Confronto OVAR-FX02 canale HNZ

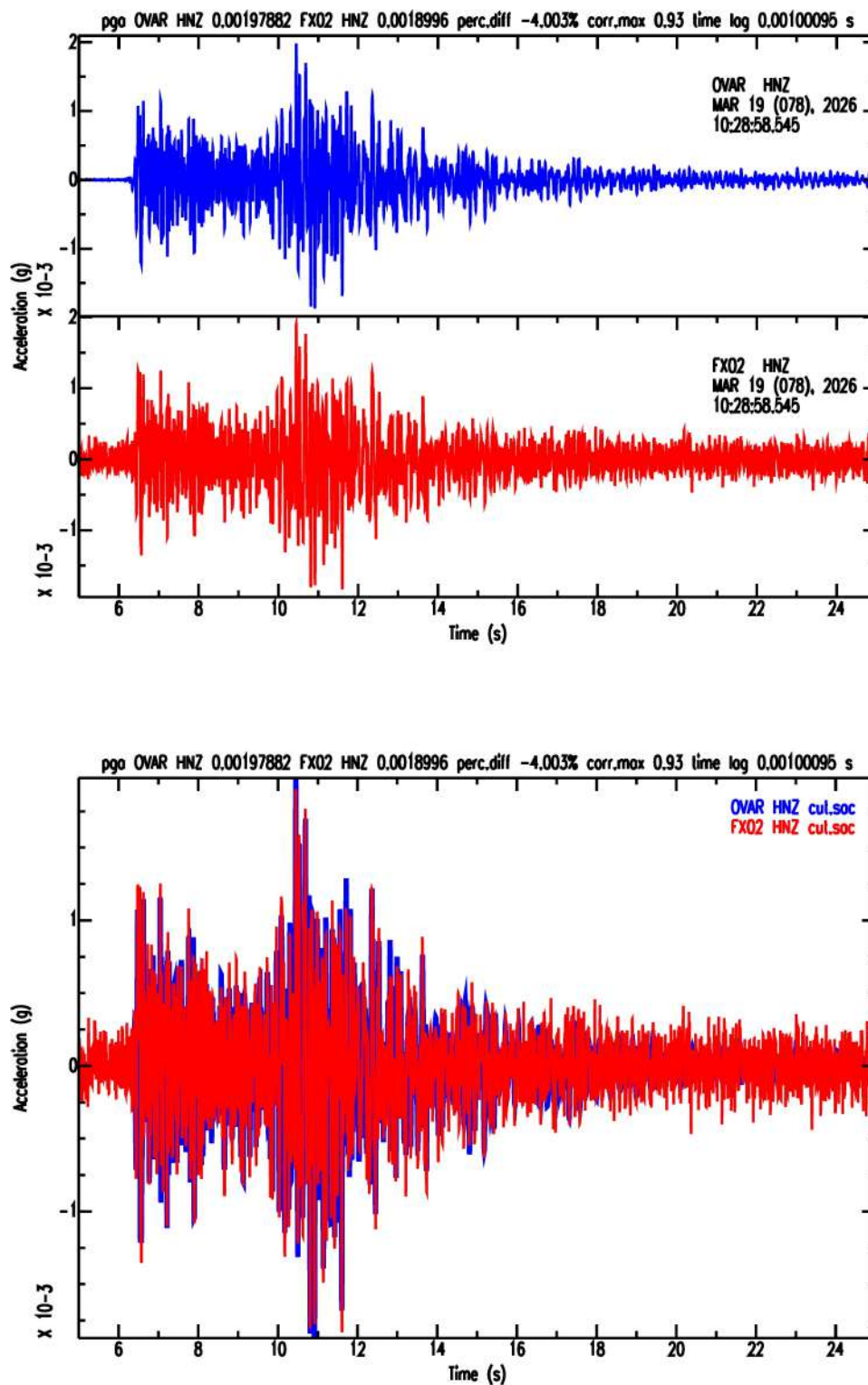


Figura 25. Confronto tra le registrazioni dei canali HNZ delle stazioni OVAR ed FX02 (registrazione completa).

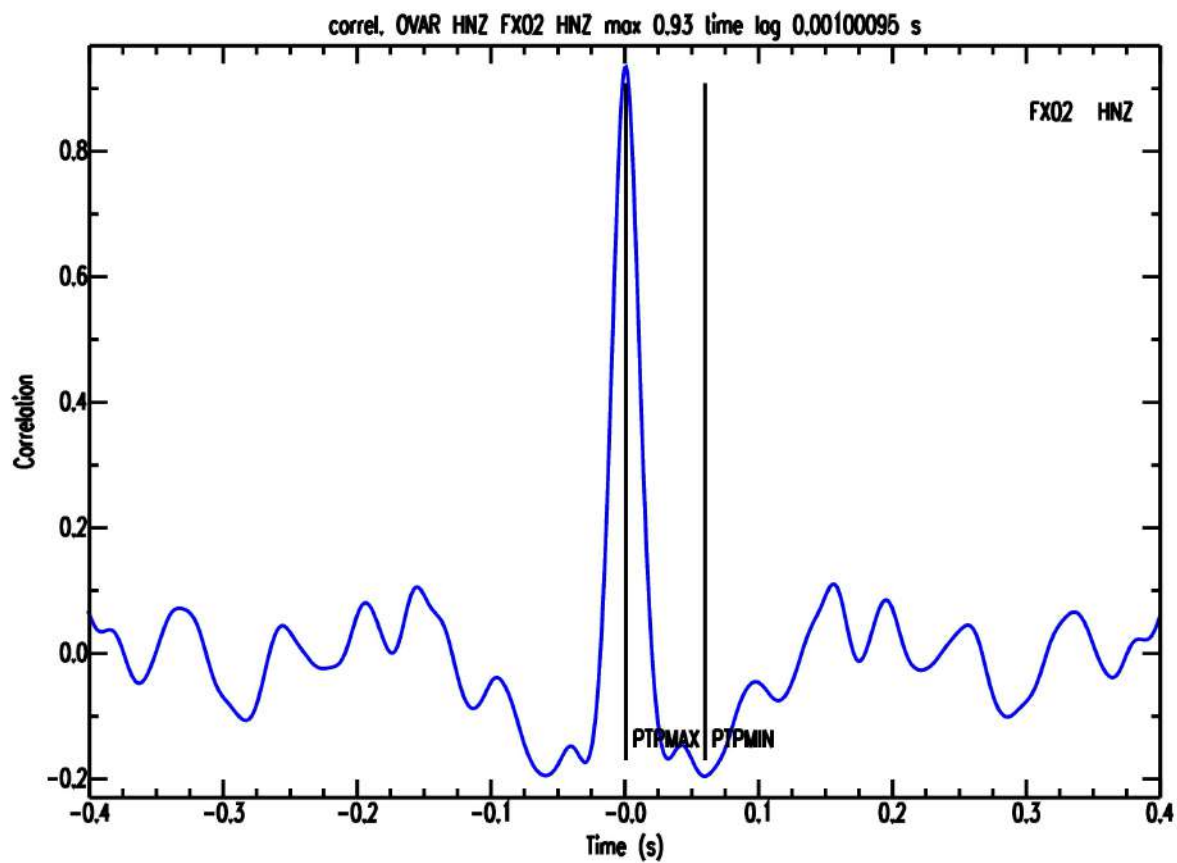


Figura 26. Funzione di cross-correlazione tra le registrazioni dei canali HNZ delle stazioni OVAR ed FX02 (registrazione completa).

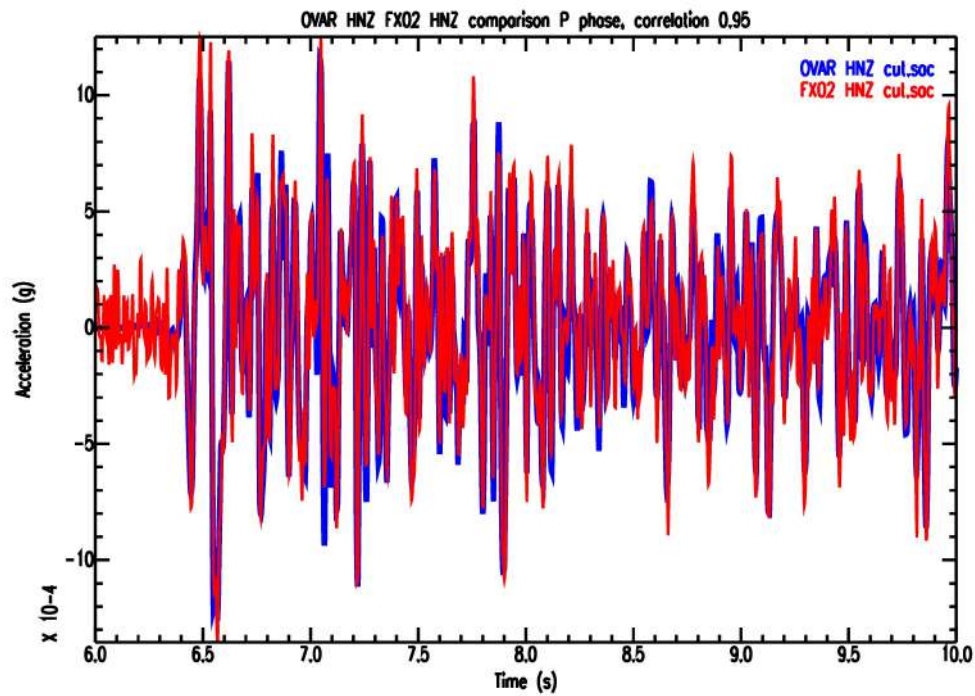
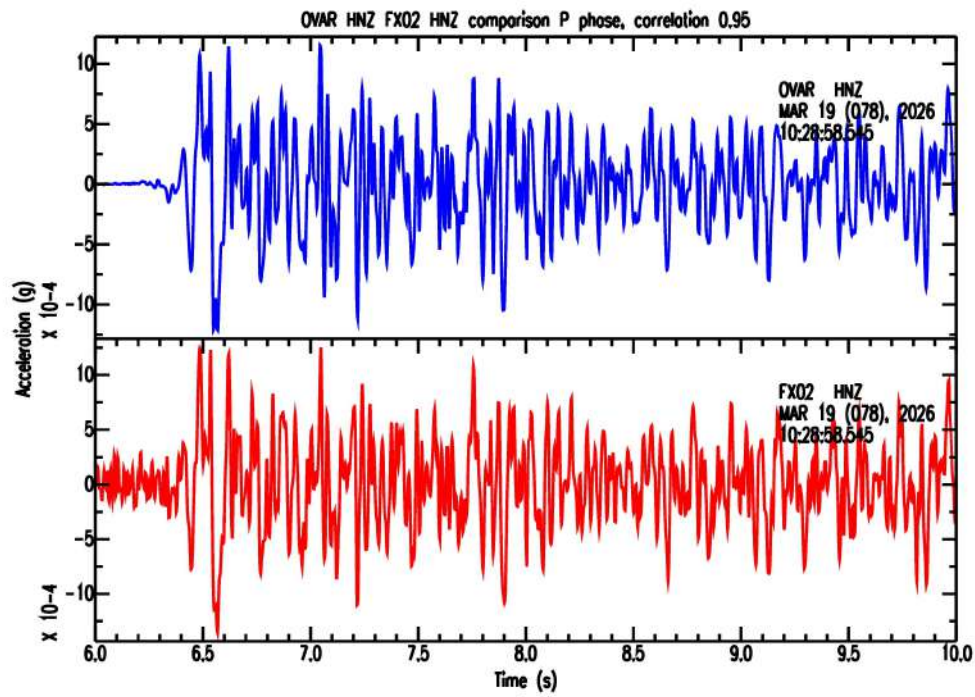


Figura 27. Confronto tra le registrazioni dei canali HNZ delle stazioni OVAR ed FX02 per la sola fase P.

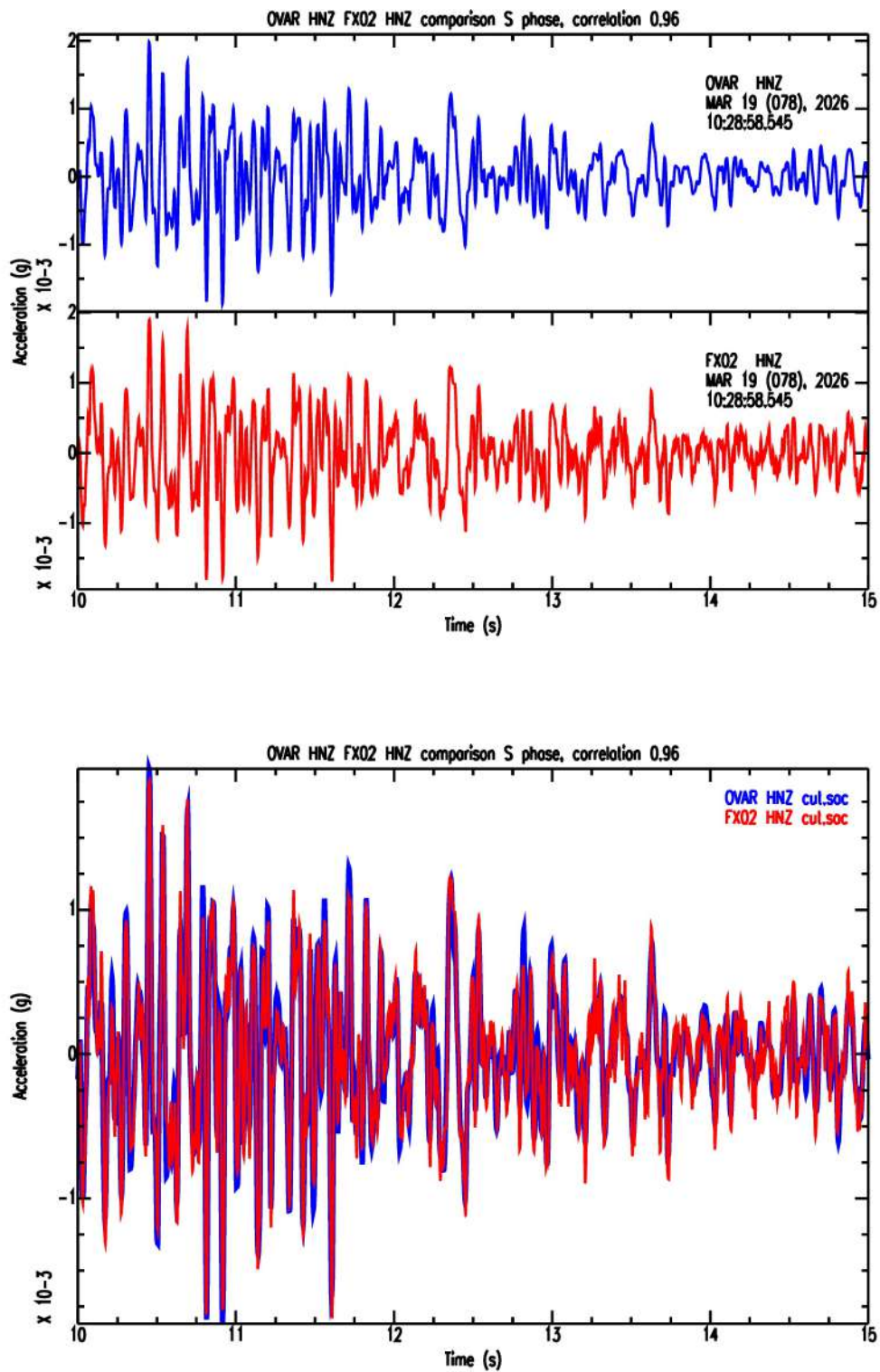


Figura 28. Confronto tra le registrazioni dei canali HNZ delle stazioni OVAR e FX02 per la sola fase S.

4. Conclusioni

La sperimentazione condotta presso le stazioni RAN di Ovaro e Pontebba, seppure concernente un unico terremoto, fornisce una prova del buon funzionamento del sismografo ADEL ASX2000, confermando quanto già emerso in test di laboratorio effettuati con il sistema a tavola vibrante dell'OGS. In particolare, la correlazione con il segnale registrato dall'accelerometro EpiSensor è in tutti i casi superiore a 0.93, rimanendo stabilmente sopra 0.99 per i segnali più energetici, con picco superiore a 0.01 g. Restringendo l'analisi alla sola fase S, dove il rapporto tra segnale e rumore elettronico dello strumento è più elevato, la correlazione dei segnali rimane stabilmente sopra 0.99 già con PGA superiore a 0.0028 g. Confrontando la PGA rilevata tra coppie corrispondenti di canali EpiSensor/ASX2000 la differenza massima rilevata è pari 0.00051 g, inferiore al millesimo di g, in linea con i livelli di rumorosità interna dell'ASX2000.