

# **Modellistica idrosedimentologica tridimensionale in corrispondenza di un sistema di pile**

**Ramón Pacheco**

*Ph.D. in Ingegneria Idraulica, Studio Pacheco – Milano (IT)*

*e-mail: ramon.pacheco@studiopacheco.it*

**Riccardo Telò**

*Ingegneria Idraulica, Studio Telò – Parma (IT)*

*e-mail: studiotelo@studiotelo.it*

# **Campi di applicazione della modellistica numerica idrosedimentologica nel contesto delle grandi opere**

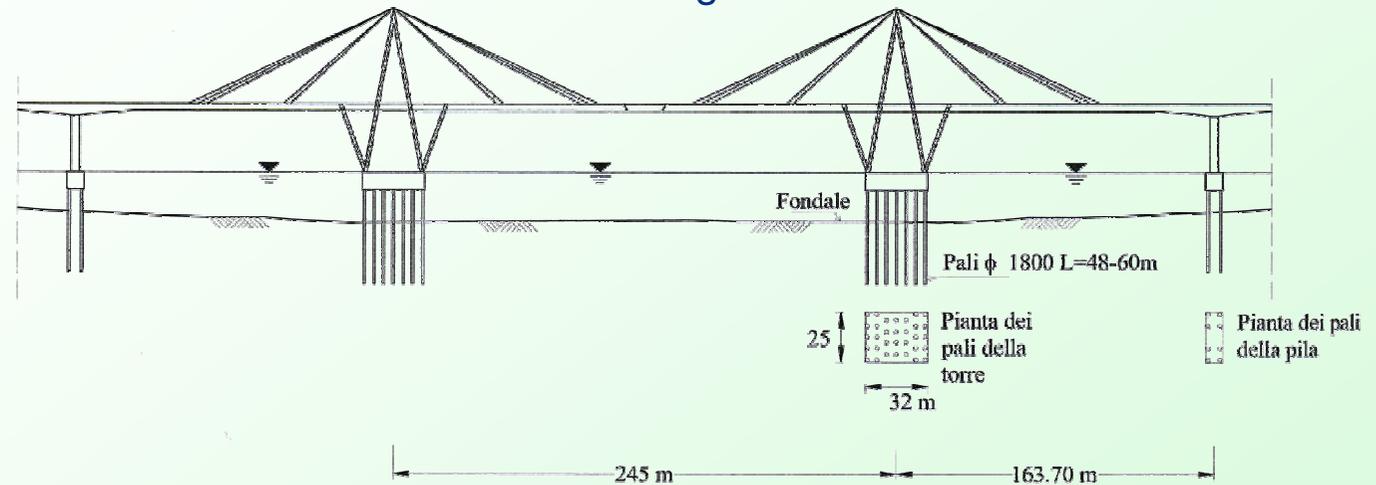
- Valutazione e verifica delle opere esistenti
- Sorveglianza e orientamenti per l'adeguamento delle strutture
- Supporto e orientamenti alla progettazione

# PONTE BELGRANO SUL RIO PARANA'

Ponte strallato stradale - tra Corrientes e Resistencia (Argentina)



Sezione longitudinale



Portata media del Rio Parana': 15000 mc/s

Tirante idrico di progetto: 25 m

Massima escursione del livello idrico: > 9m

Possibile scalzamento: tra 10 e 20 m

Fondazioni in acqua:

32 pali per ciascuna torre

$\phi$  1800 mm

Lunghezza: tra 48 e 60 m

Carico assiale: 1100 tonnellate

Luci: 163.7 + 245 + 163.7 m



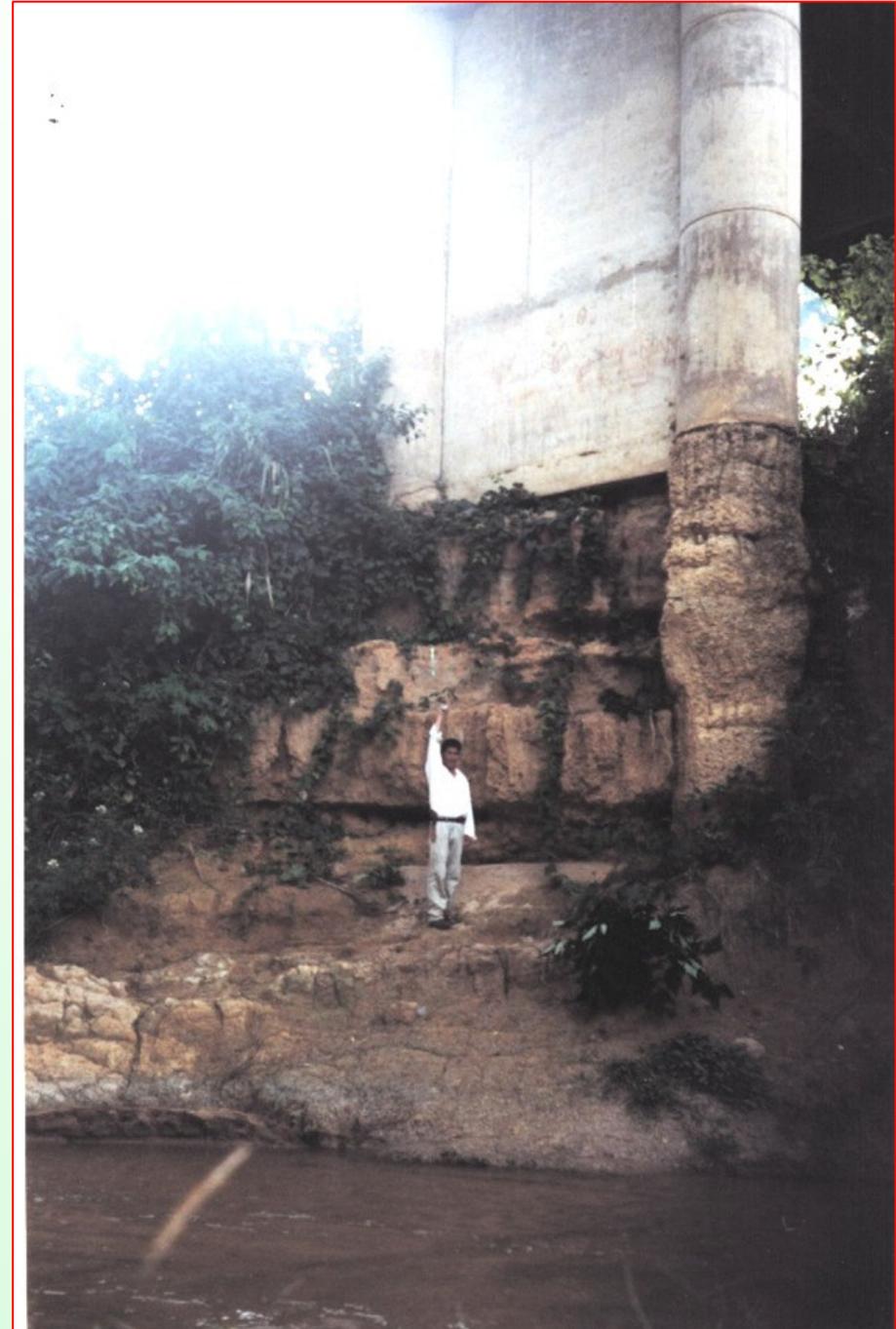
## Ponte Baltazar Bolivia Dicembre 2006

Erosione localizzata e generalizzata intorno alle pile del ponte.

Abbassamento del fondo di 8m.

Fondazione su pali di lunghezza tra 10m e 14m.

Depositi prevalentemente limosi e argillosi.



# CASO DI STUDIO: PONTE STRALLATO STRADALE

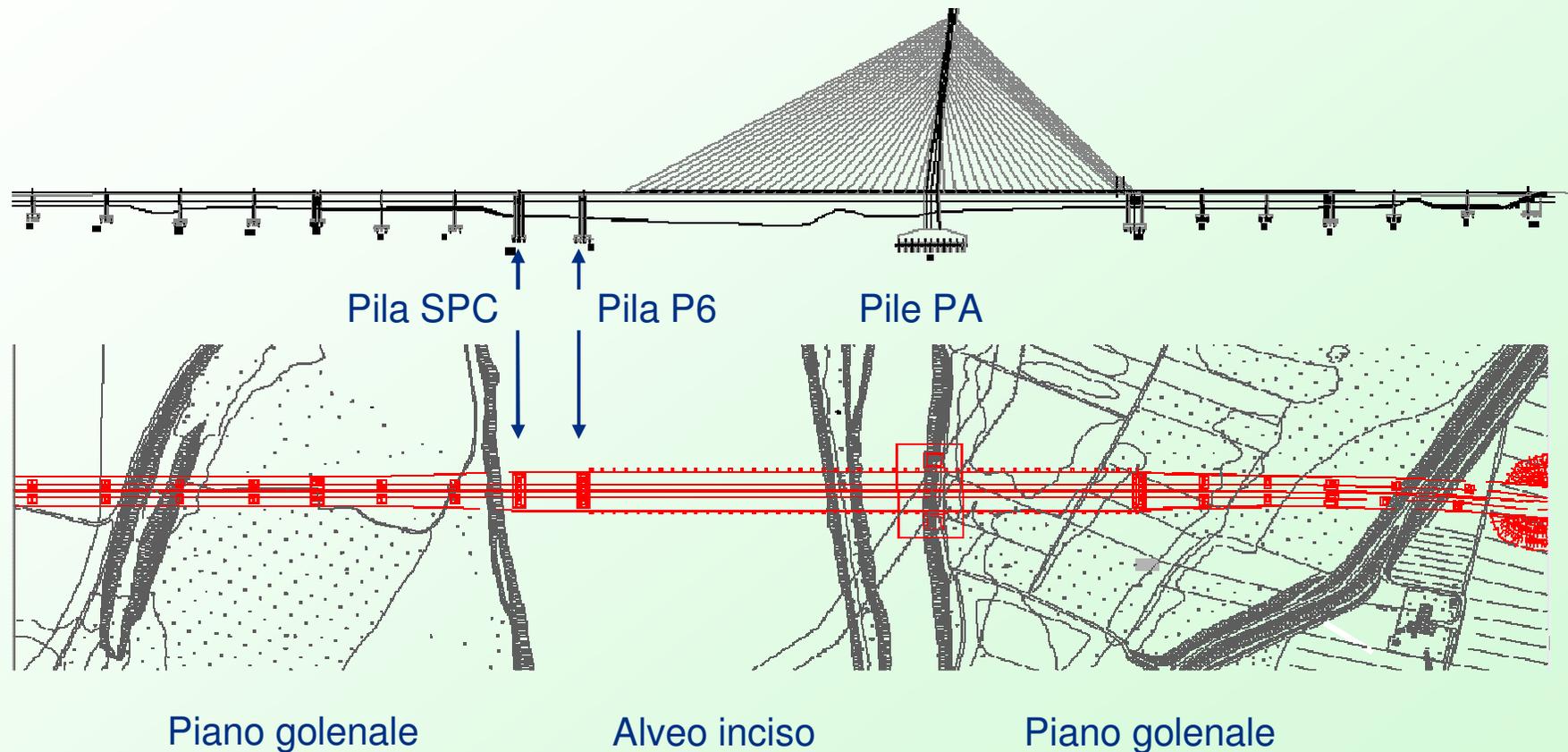
Ponte strallato con due campate principali: 270 + 160 m

Massima altezza della torre rispetto al piano stradale: 139 m

Portata di verifica: 14000 mc/s

Tirante idrico di progetto: 13 m

Massima escursione del livello idrico: > 9m



# METODOLOGIE NUMERICHE

- ✓ MODELLAZIONE MATEMATICA A SCALA RIDOTTA
- ✓ MODELLAZIONE MATEMATICA A SCALA DISTORTA
- ✓ MODELLAZIONE NUMERICA A SCALA DI PROTOTIPO
- ✓ MODELLAZIONE IBRIDA (FISICA E MATEMATICA),  
COME NUOVA ALTERNATIVA

# MODELLAZIONE MATEMATICA

## SCHEMATIZZAZIONE

### **OUTPUT DELLA MODELLAZIONE MATEMATICA**

- Valutazione della **forma** e della **posizione** del sistema pila-fondazione, al fine di minimizzare l'interazione con la corrente idrica e la conseguente erosione;
- Definizione del **layout** del sistema pila-fondazione e calcolo della **profondità di erosione** attorno alla pila.

### **STRUTTURA DEL MODELLO MATEMATICO QUI PRESENTATO**

MODELLO IDRODINAMICO 3D

Equazioni 3D di Navier-Stokes  
+  
Modello di turbolenza k-ε

MODELLO DI TRASPORTO 3D

Equazione avveviva-diffusiva  
per il *trasporto in sospensione*

MODELLO MORFOLOGICO 2D

Formule empiriche per il *trasporto di fondo*  
Verifica del fenomeno di *sandslide*

# Considerazioni progettuali applicate al modello matematico

- Simulazione alla scala del prototipo;
- Simulazione con acqua chiara;
- Non considerazione dell'effetto dell'assortimento granulometrico;
- Considerazione del solo trasporto solido di fondo;
- Valutazione dell'effetto di sand slide nel modello morfologico;
- Correzione dello sforzo critico in funzione della pendenza;
- Condizione stazionaria della portata liquida;
- Modello idrodinamico disaccoppiato dal modello morfologico;
- Tempo di esposizione 24 ore;
- Applicazione del modello morfologico ogni 15 minuti.

# MODELLAZIONE IDRODINAMICA

## EQUAZIONI DI NAVIER-STOKES

Equazioni di continuità

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0$$

Equazioni di conservazione della quantità di moto

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \nabla \cdot (\rho(U \otimes U) - \mu_{eff}(\nabla U + (\nabla U)^T)) = \nabla p'$$

Pressione

$$p' = p + \frac{2}{3}\rho k - \rho_f \vec{g} \cdot X$$

dove

$\rho$  = densità di massa della miscela acqua-sedimenti [kg/m<sup>3</sup>]

$U$  = vettore velocità [m/s]

$\mu_{eff}$  = viscosità dinamica effettiva [Ns/m<sup>2</sup>] (vedi il modello di turbolenza)

$p'$  = pressione dinamica [Pa]

$p$  = pressione statica [Pa]

$k$  = energia cinetica turbolenta [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>] (vedi il modello di turbolenza)

$\rho_f$  = densità di massa dell'acqua [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  = gravità [m/s<sup>2</sup>]

$X$  = coordinata spaziale [m]

# MODELLAZIONE IDRODINAMICA

## MODELLO DI TURBOLENZA E EFFETTO DI PARETE

Modello di turbolenza k-ε

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_T$$

$\mu$  = viscosità laminare [Ns/m<sup>2</sup>]

$\mu_T$  = viscosità turbolenta [Ns/m<sup>2</sup>], calcolata come

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

dove

$C_\mu$  = parametro empirico = 0.09

$\rho$  = densità di massa della miscela acqua-sedimenti [kg/m<sup>3</sup>]

$k$  = energia turbolenta cinetica [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]

$\varepsilon$  = tasso di dissipazione

$$\left. \begin{array}{l} k \\ \varepsilon \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot \left( \rho U k - \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) = P + G - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot \left( \rho U \varepsilon - \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) = C_1 \frac{\varepsilon}{k} (P + C_3 \max(G, 0)) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{cases}$$

$$\tau_w = T_M (-U_w)$$

dove

$\tau_w$  = sforzo alla parete [Pa]

$U_w$  = vettore velocità parallelo alla parete [m/s]

$$T_M = \begin{cases} \mu / y & \text{per } y^+ \leq y_0^+ \\ \frac{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} \kappa}{\ln(E y^+)} & \text{per } y^+ \geq y_0^+ \end{cases}$$

# TRASPORTO DI SEDIMENTI

## FORMULAZIONI

### Formula generale per il trasporto di sedimenti sul fondo

$$\Phi = \Phi(\theta) = \alpha \theta^{n-\gamma} (\mu\theta - \theta_c)^\gamma$$

MPM-type formula: soglia  $\theta_c$  per l'incipiente movimento  
EH-type formula: nessuna soglia per l'incipiente movimento

Parametro di Shields  $\theta$

$$\theta = \frac{u_*^2}{g\Delta d}$$

Parametro di Einstein  $\Phi$

$$\Phi = \frac{q_s}{d\sqrt{g\Delta d}} \Rightarrow q_s = \Phi d\sqrt{g\Delta d}$$

### Equazione avvertiva-diffusiva per il trasporto di sedimenti in sospensione

$$\rho \left( \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uC) + \frac{\partial}{\partial y}(vC) \right) = \rho \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right) - D + D$$

$u^*$  = velocità d'attrito [m/s]

$g$  = gravità [m/s<sup>2</sup>]

$\Delta = (\rho_s - \rho_f) / \rho_f$  [-]

$\rho_s$  = densità di massa dei sedimenti [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_f$  = densità di massa dell'acqua [kg/m<sup>3</sup>]

$d$  = diametro del grano [m]

$q_s$  = portata solida per unità di larghezza [m<sup>2</sup>/s]

$\rho$  = densità di massa della miscela acqua - sedimenti [kg/m<sup>3</sup>]

$C$  = concentrazione solida massica in sospensione mediata sulla verticale [kg/kg],

$u$  e  $v$  = velocità della corrente lungo  $x$  e  $y$  [m/s]

$D_{xx}$  e  $D_{yy}$  = coefficienti di diffusività lungo  $x$  e  $y$  [m<sup>2</sup>/s]

$E$  = tasso di erosione verticale [kg/s/m<sup>2</sup>],

$D$  = tasso di deposizione verticale [kg/s/m<sup>2</sup>]

$h$  = tirante idrico [m]

# MODELLAZIONE MORFOLOGICA

Schema geometrico per l'integrazione dell'equazione di conservazione della massa solida

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \left( \nabla \times H_s + \frac{\varphi_1 E - D}{\rho_s} \right) = 0$$

$$\underline{H_s} = \varphi_2 [q_{sx}, \varphi_3 q_{sy}]$$

$Z$  = quota del fondo  $Z$  [m s.l.m.]

$T$  = tempo [s]

$p$  = porosità dei sedimenti [-]

$E$  = tasso di erosione in direzione verticale [kg/s/m<sup>2</sup>],

$D$  = tasso di deposizione in direzione verticale [kg/s/m<sup>2</sup>]

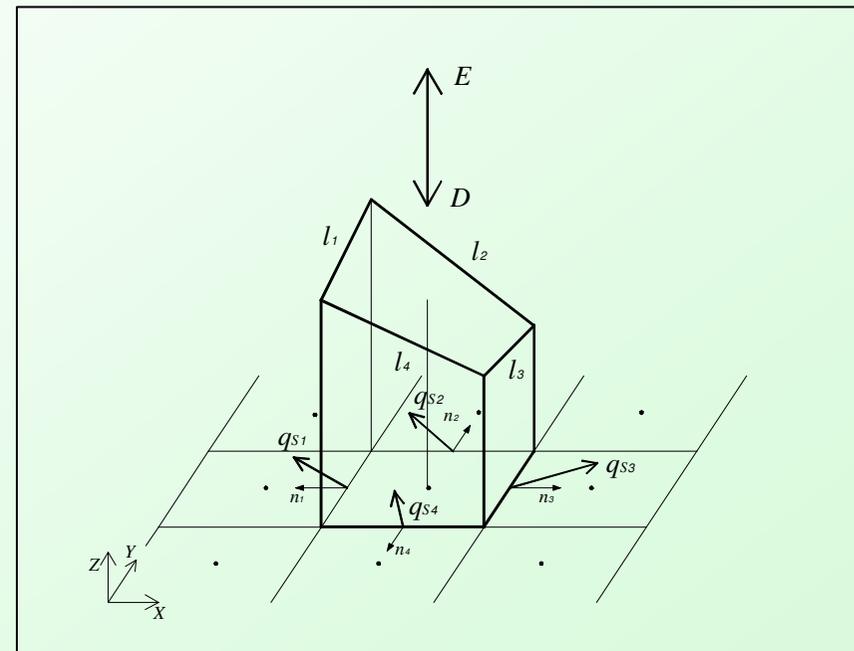
$\rho_s$  = densità di massa dei sedimenti [kg/m<sup>3</sup>]

$q_{sx}$  e  $q_{sy}$  = portata solida sul fondo lungo  $x$  e  $y$  per unità di larghezza [m<sup>2</sup>/s]

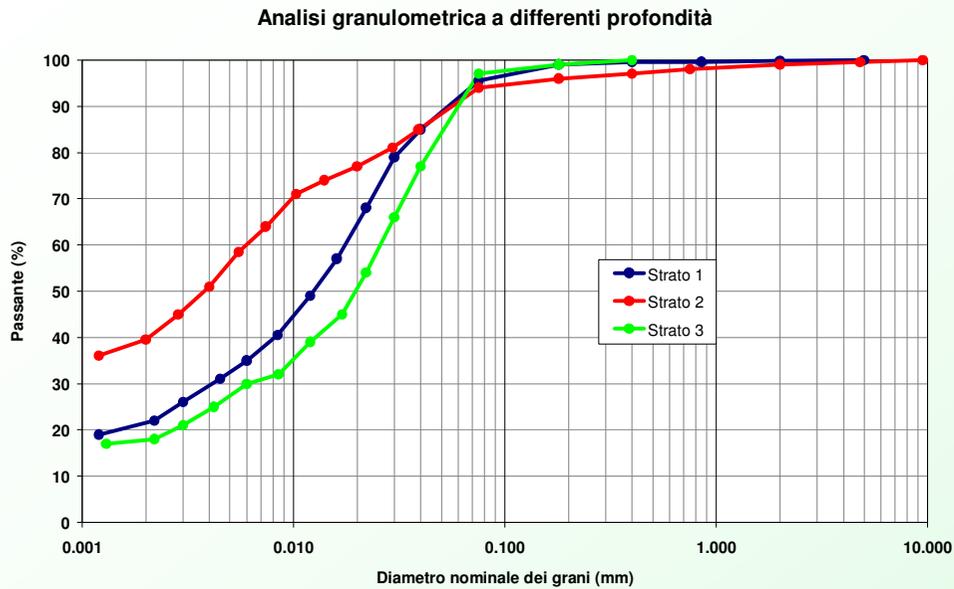
$\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$  = pesi compresi fra 0 e 1 [-]

Viene inoltre effettuata la verifica a *sandslide*.

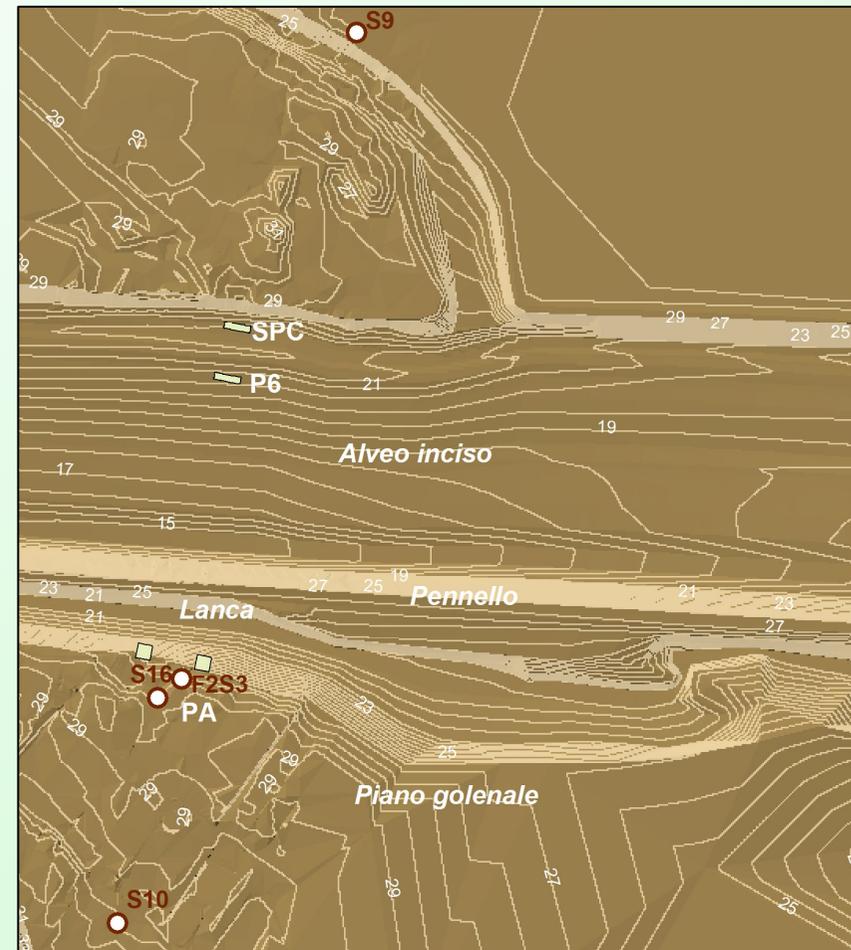
Il sistema di equazioni è risolto in forma disaccoppiata adottando differenti intervalli temporali di integrazione numerica per le parti liquida e solida.



# CASO DI STUDIO: DATI



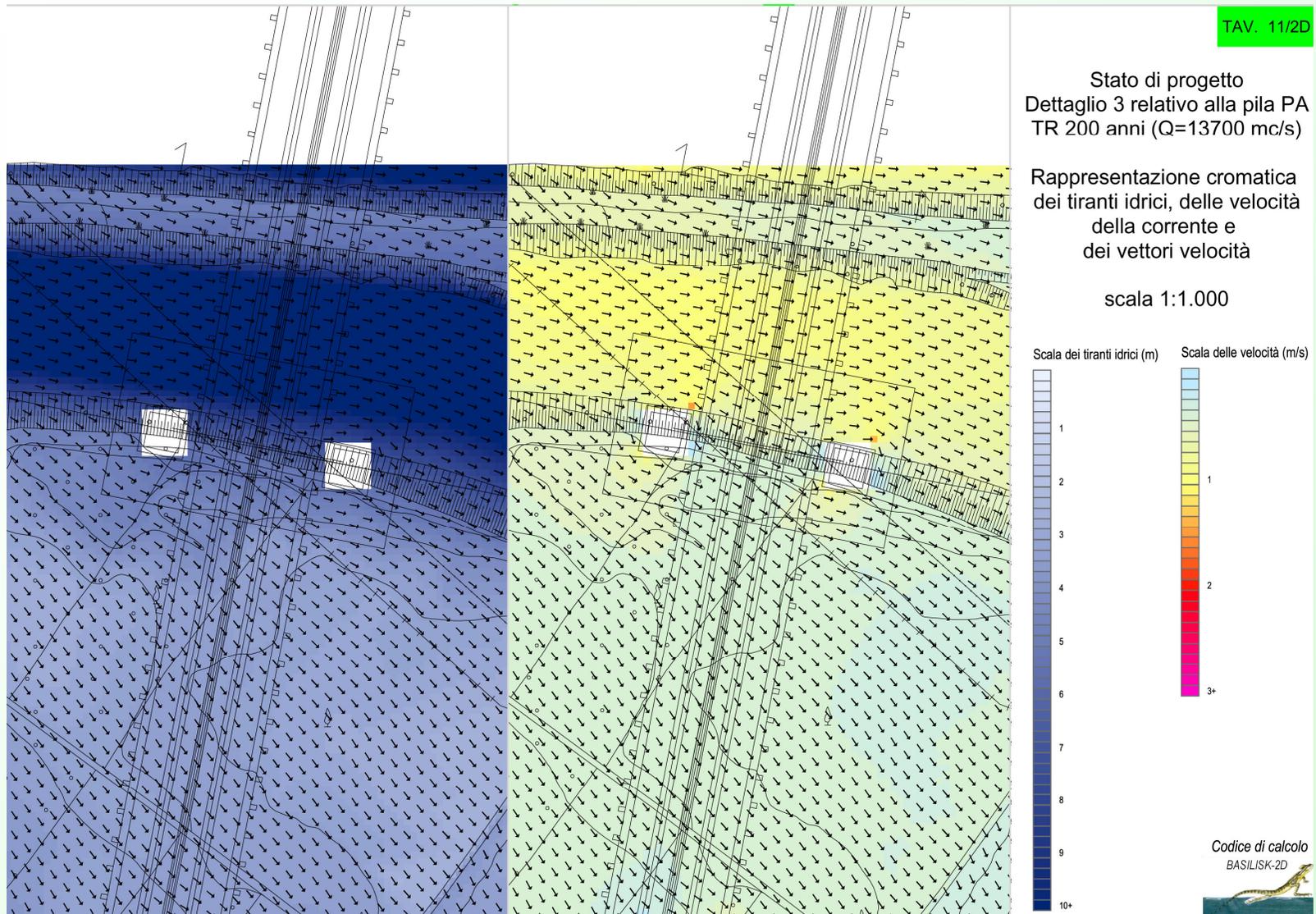
## Composizione granulometrica del terreno a differenti profondità



## Batimetria e indagini geologiche

Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte

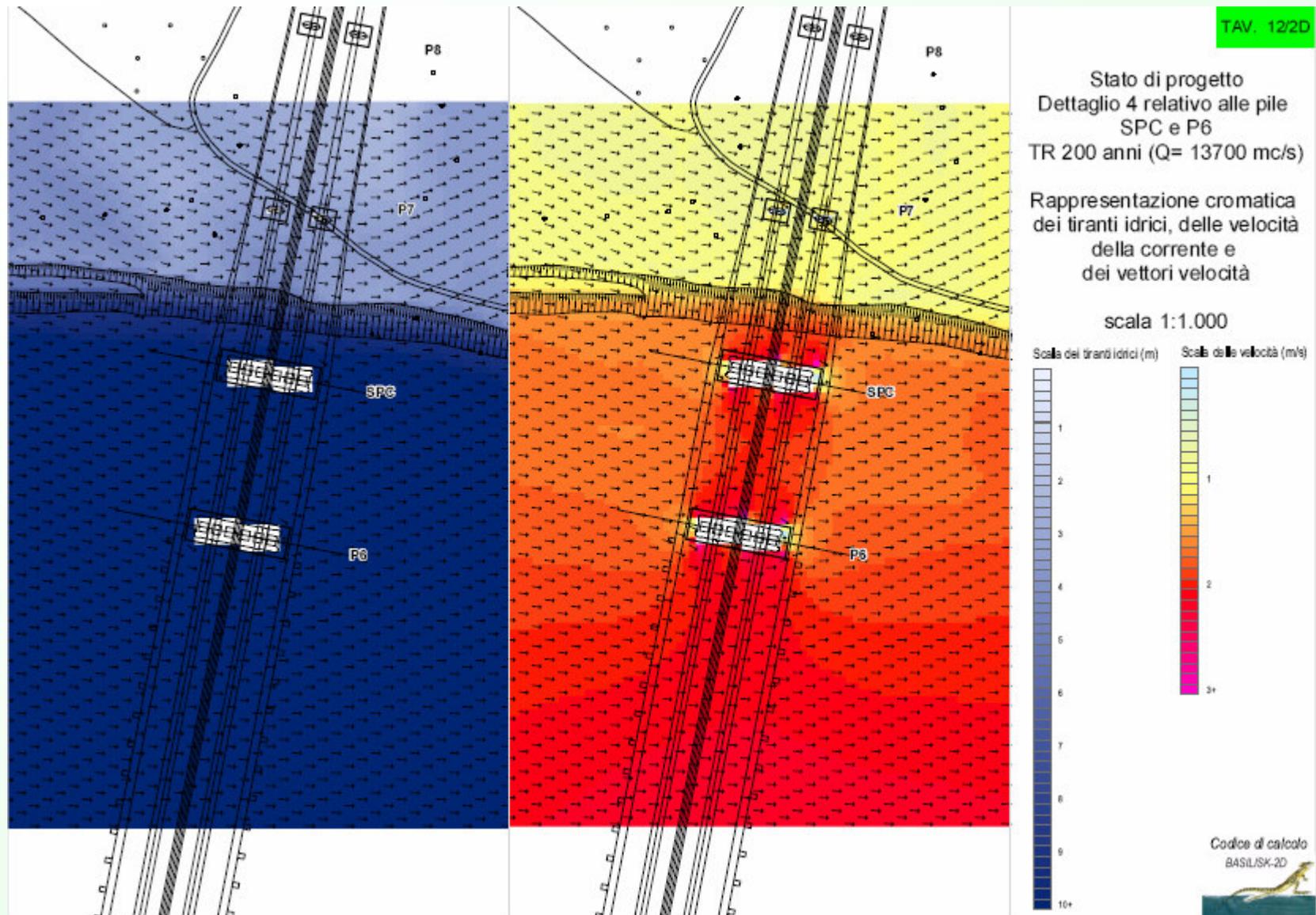
# CASO DI STUDIO: PILA ANTENNA SUL PIANO GOLENALE



## Modellazione idrodinamica 2D di dettaglio

Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte

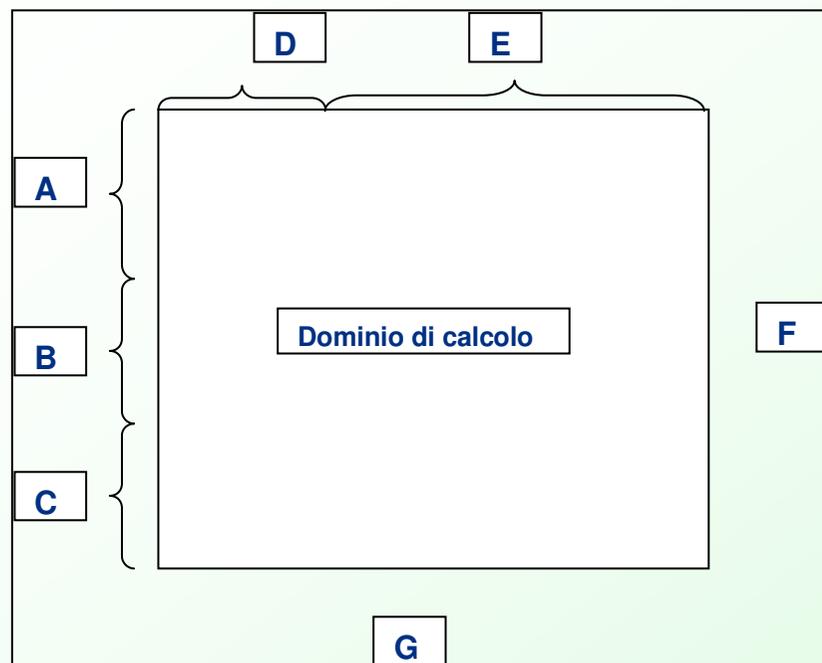
# CASO DI STUDIO: PILE SULL'ALVEO INCISO



*Modellazione idrodinamica 2D di dettaglio*

Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte

## Dominio di calcolo PILE PA e condizioni al contorno



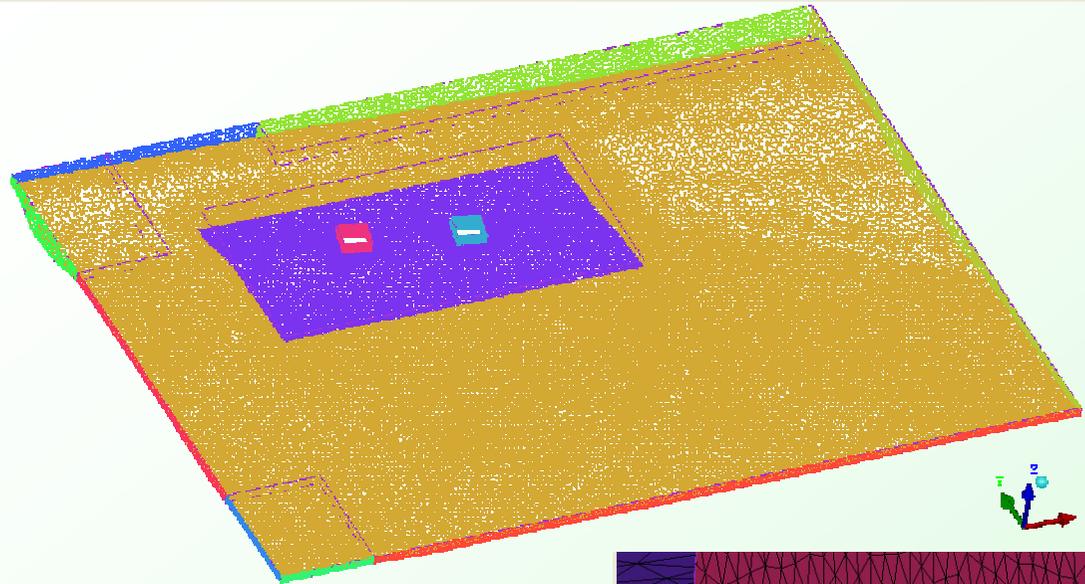
Tratto del lato di ingresso	Lunghezza (m)	Portata (m <sup>3</sup> /s)
Lato A	70	440.4
Lato B	158	190.6
Lato C	58	28.5
<b>Totale</b>	<b>286</b>	<b>659.5</b>

Tratto del lato di ingresso	Lunghezza (m)	Portata (m <sup>3</sup> /s)
Lato D	116	351.5
Lato E	262	309.7
<b>Totale</b>	<b>378</b>	<b>661.2</b>

- Lato uscita valle (F): OPENING Pressione statica imposta nulla (equivale a imporre le derivate normali di tutte le grandezze nulle).
- Lato uscita DX (G): OUTLET MASSFLOW portata imposta sul lato di uscita 308 m<sup>3</sup>/s.
- Pareti Pile: WALL parete idraulicamente liscia con funzioni di parete (velocità nulle).
- Fondo alveo: WALL parete non liscia con funzioni di parete (velocità nulle).  
E' stata impostata una rugosità equivalente pari a 0.002m che corrisponde a sabbia mista ghiaia sottile o terra battuta [1].
- Superficie libera: WALL FREE SLIP parete liscia con libero scorrimento (sforzo nullo).

# CASO DI STUDIO

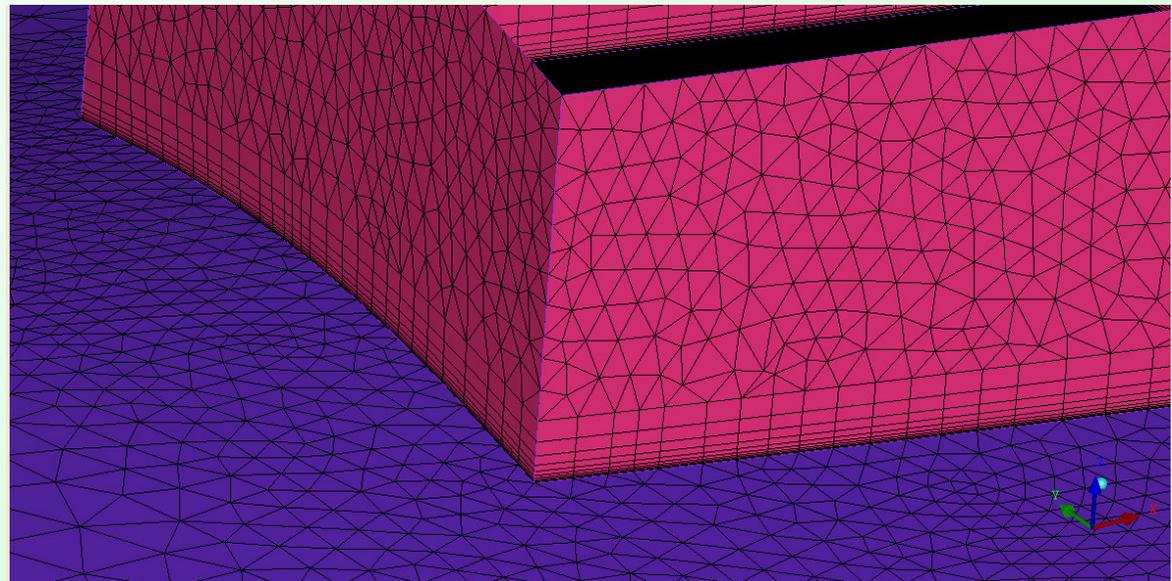
## MODELLAZIONE IDRODINAMICA 3D (CFX-5)



*Mesh di calcolo 3D  
caso PA*

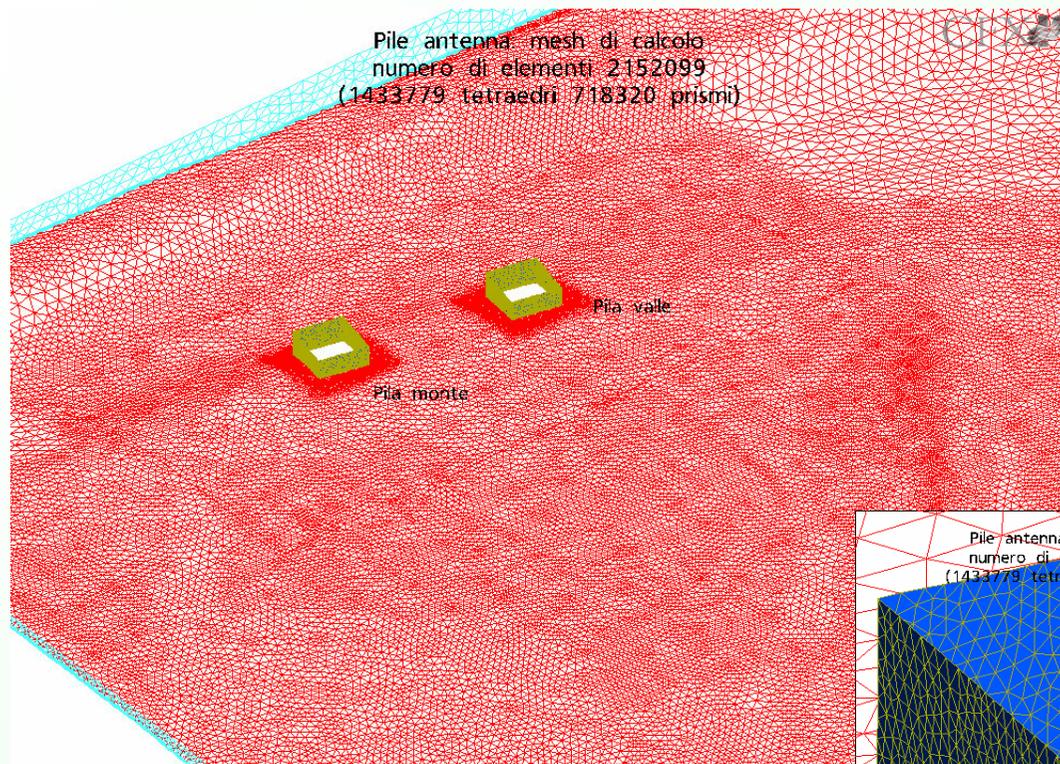
*N° elementi tetraedrici 1433779  
N° elementi prismi 718320  
N° nodi 644389*

*Mesh di calcolo 3D.  
Dettaglio di una pila.*



# CASO DI STUDIO

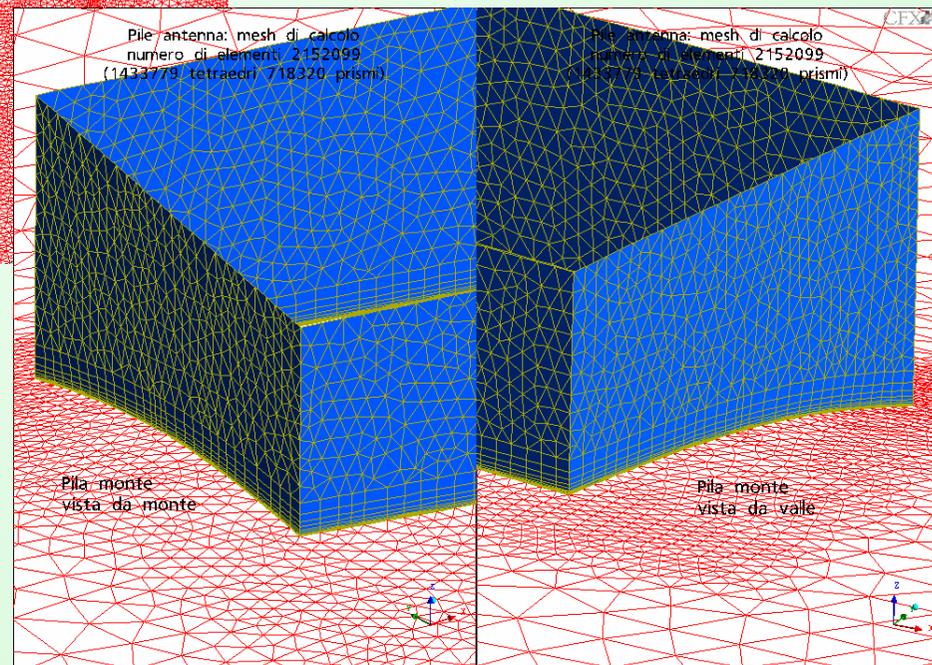
## MODELLAZIONE IDRODINAMICA 3D (CFX-5)



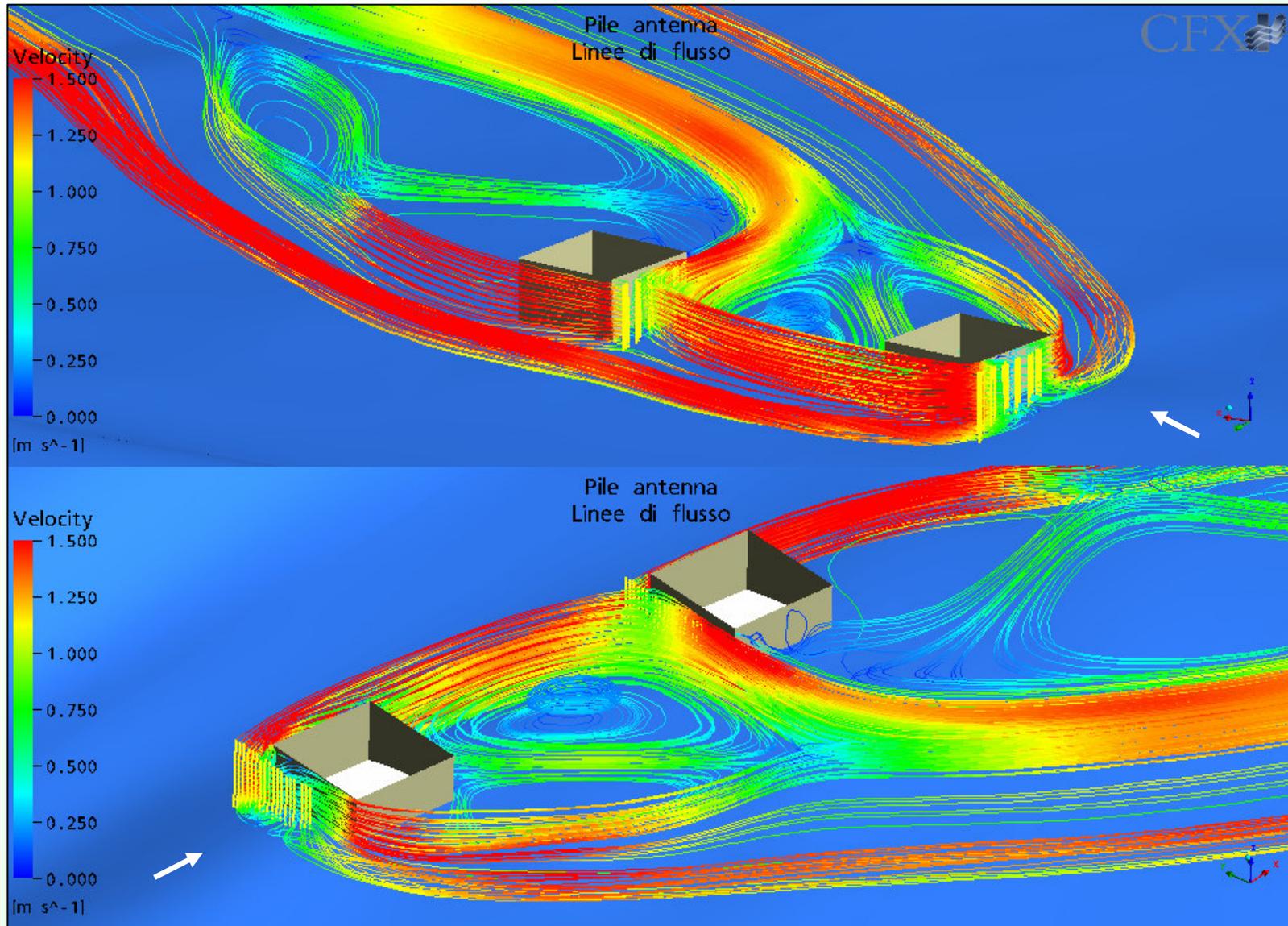
### Mesh di calcolo 3D caso PA

*N° elementi tetraedrici 1433779*  
*N° elementi prismi 718320*  
*N° nodi 644389*

*Mesh di calcolo 3D.  
Dettaglio di una pila.*



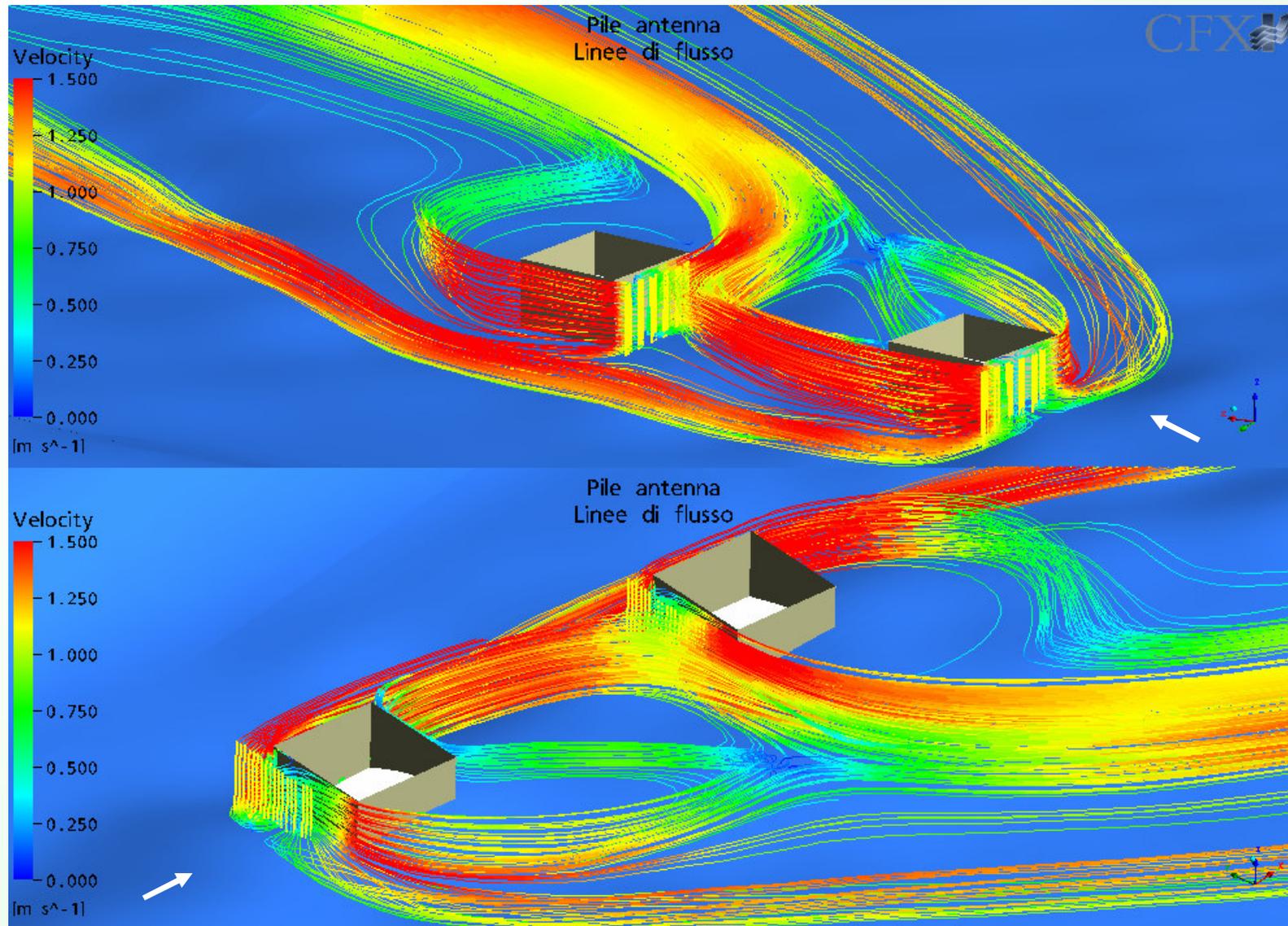
# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



*Linee di corrente (istante iniziale)*

Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte

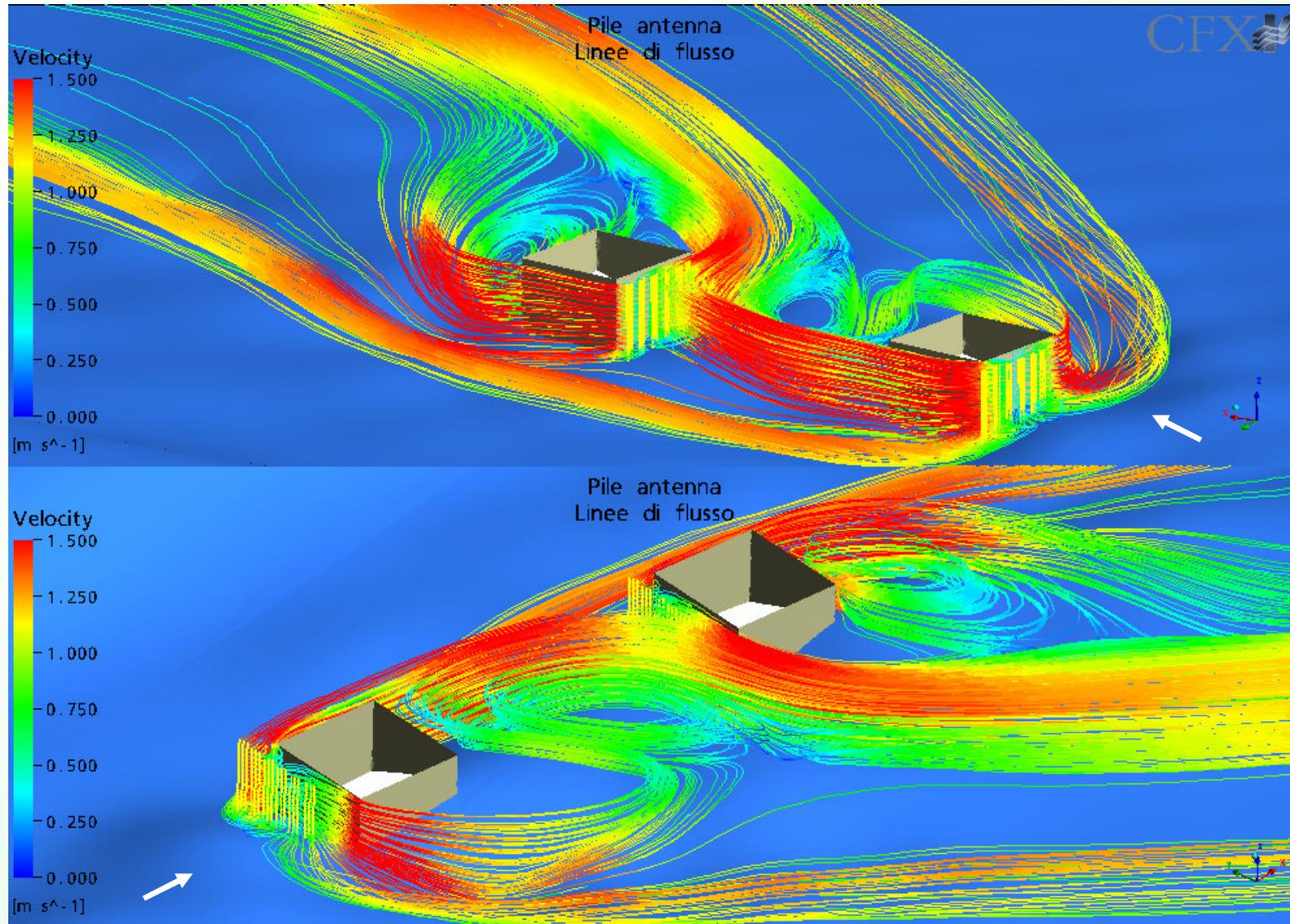
# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



*Linee di corrente (dopo 4 ore)*

Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte

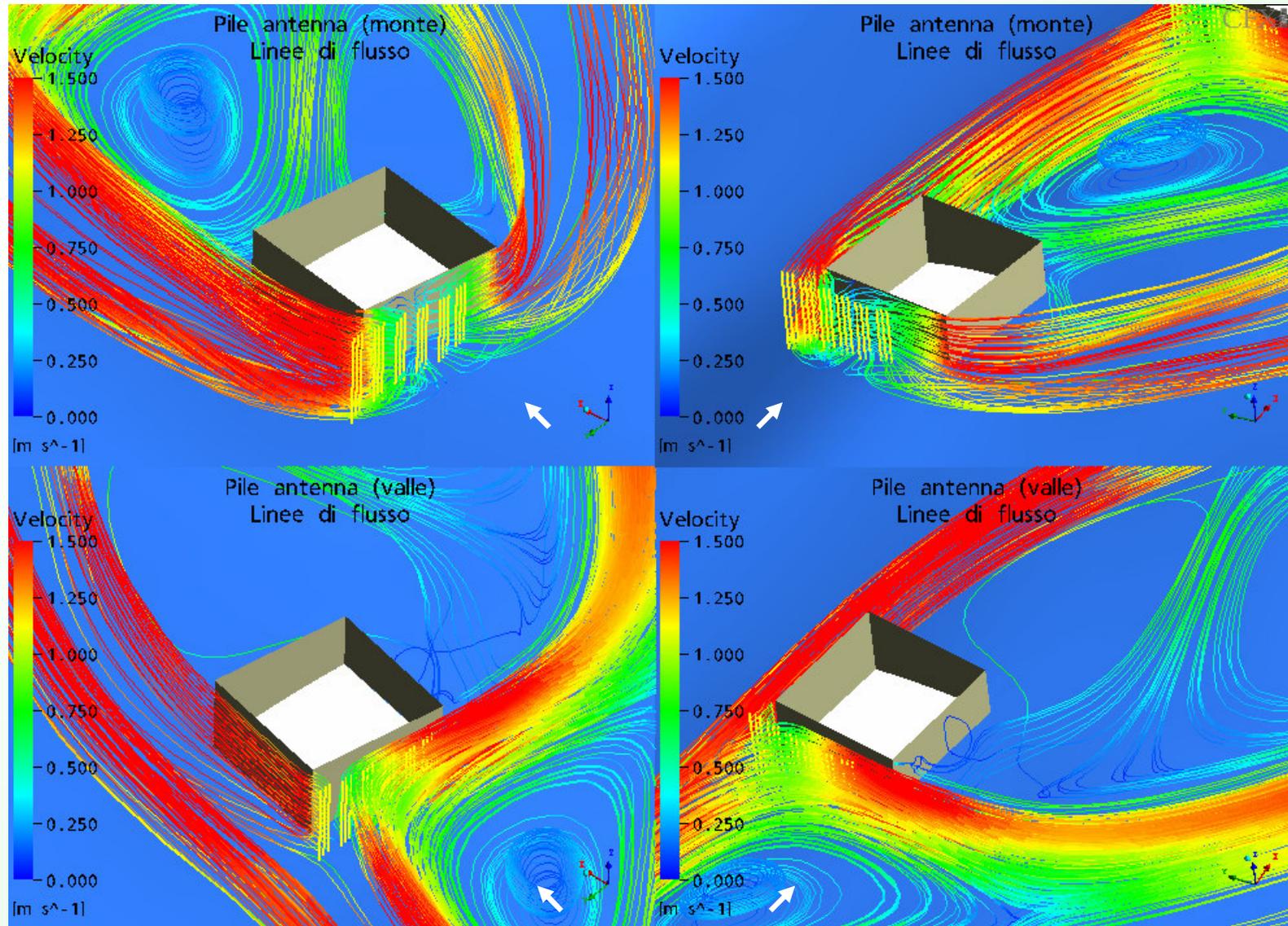
# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



*Linee di corrente (dopo 8 ore)*

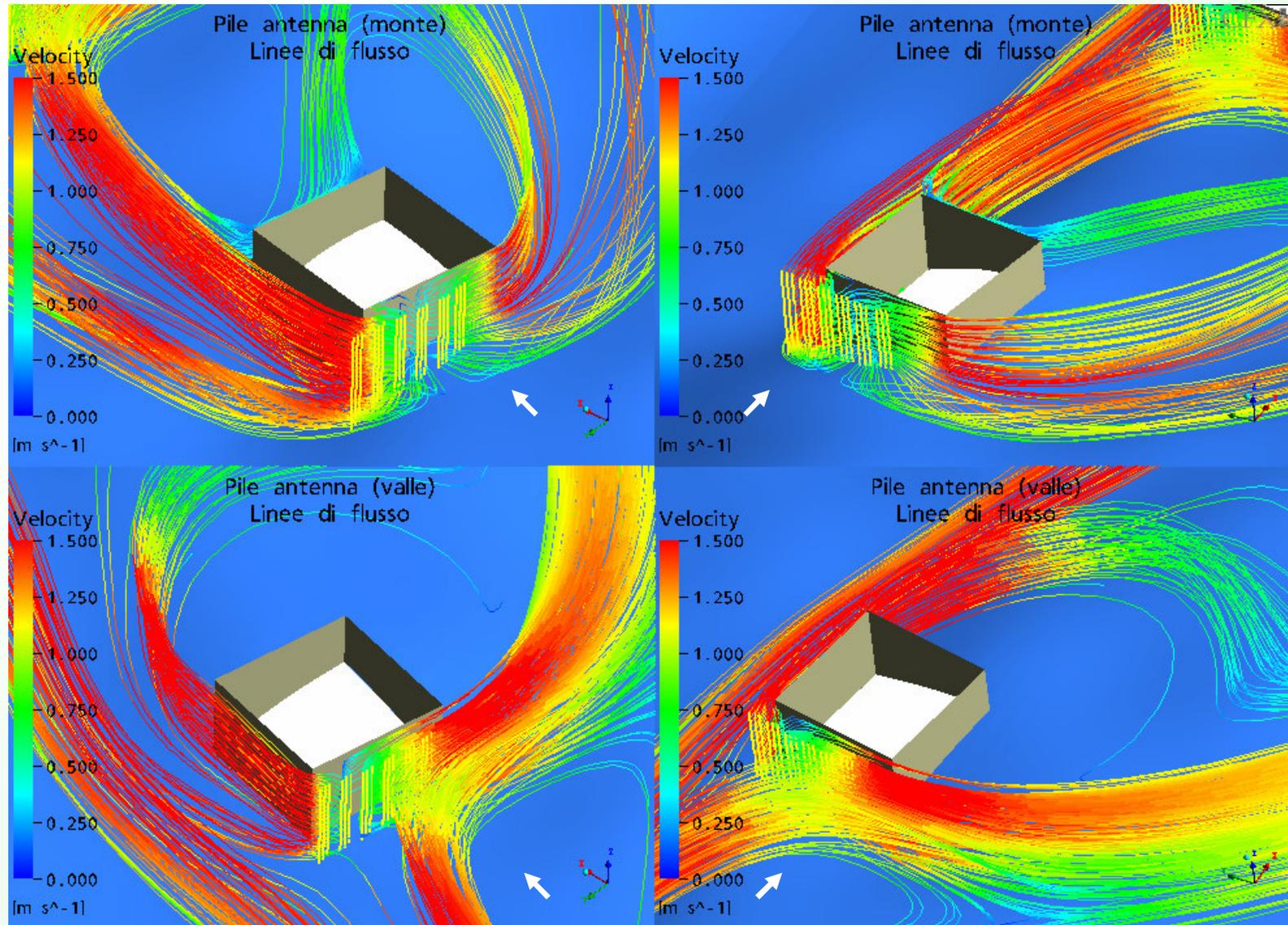
Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



*Linee di corrente particolare (istante iniziale)*

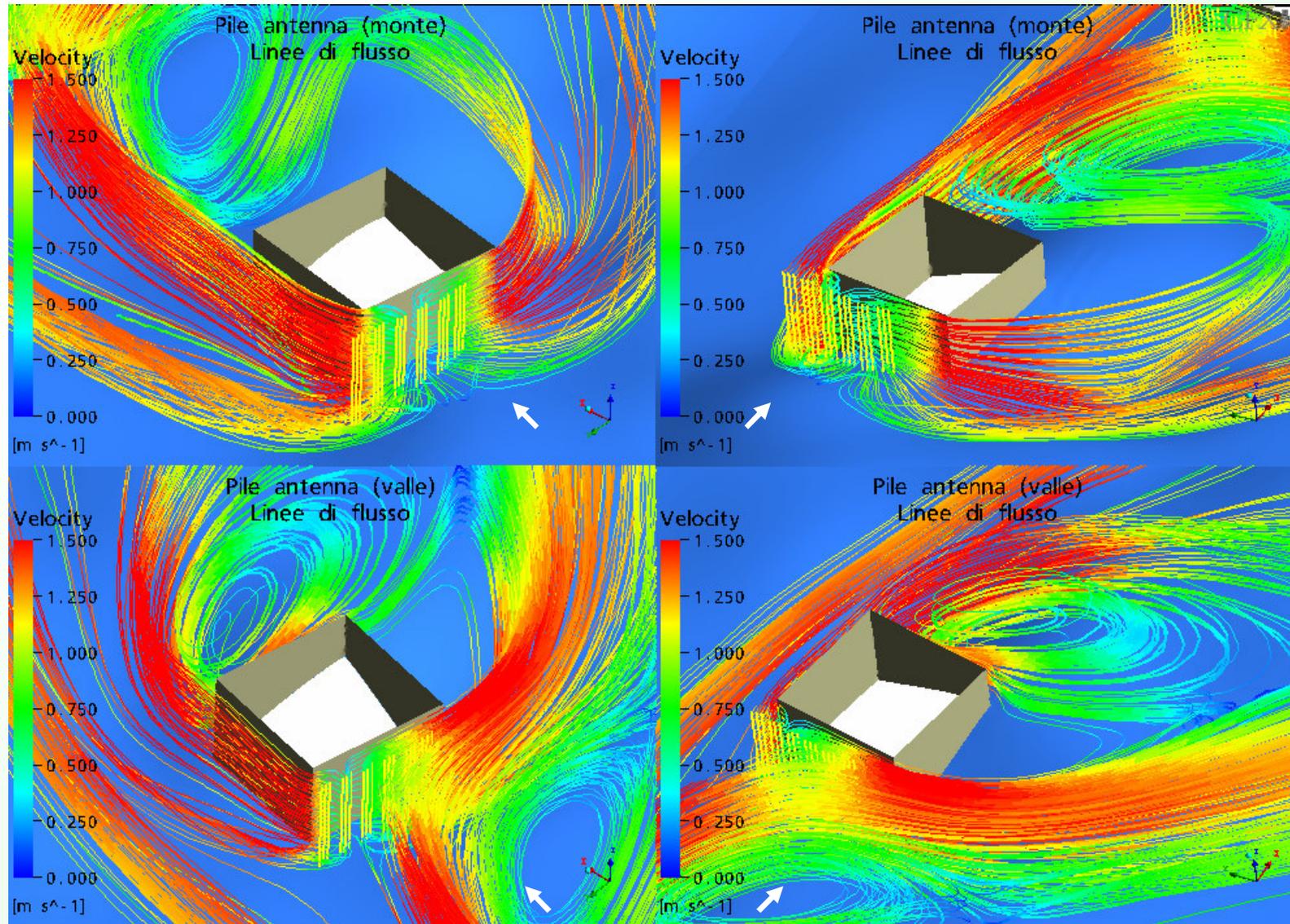
# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



*Linee di corrente particolare (dopo 4 ore)*

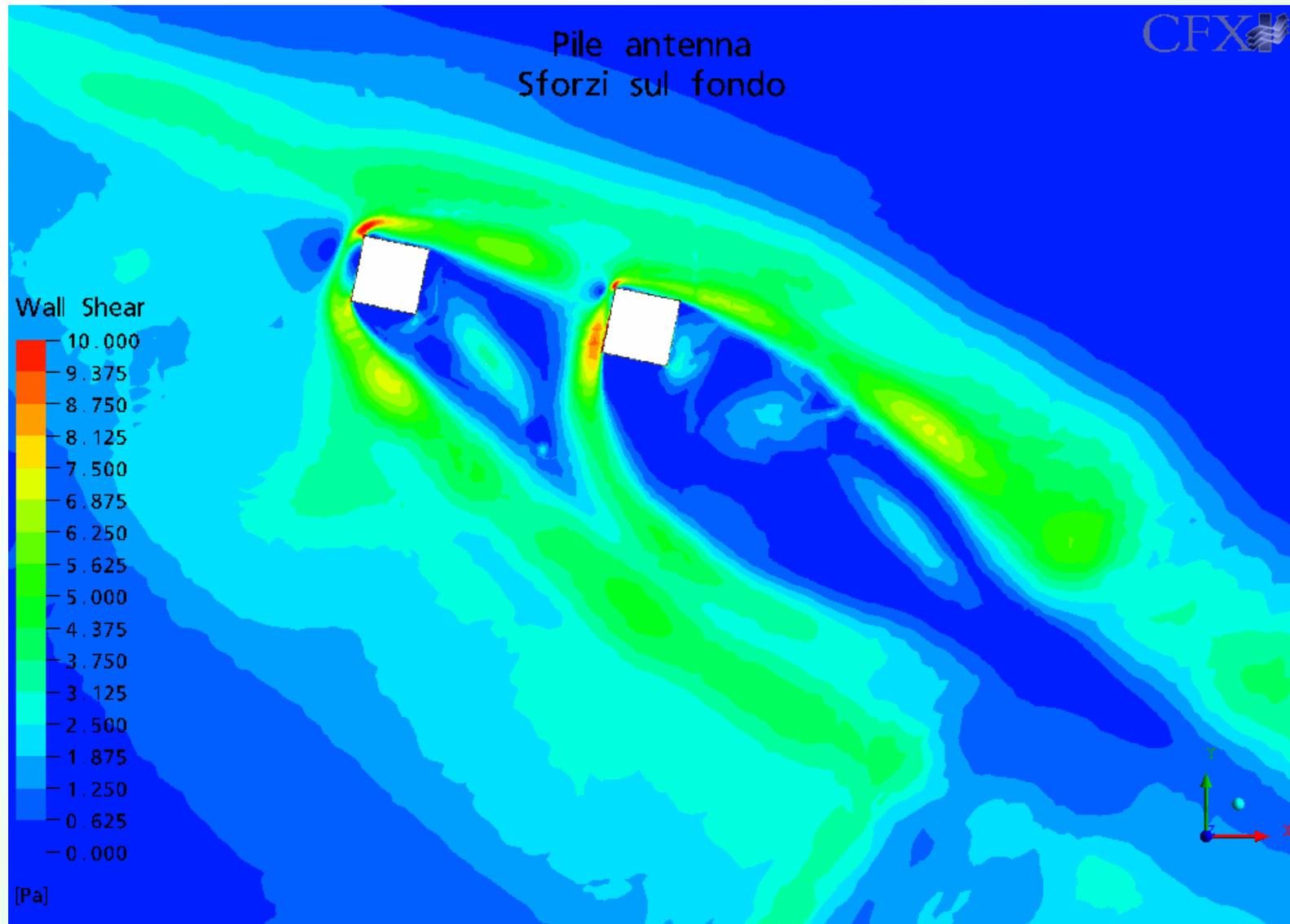
Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



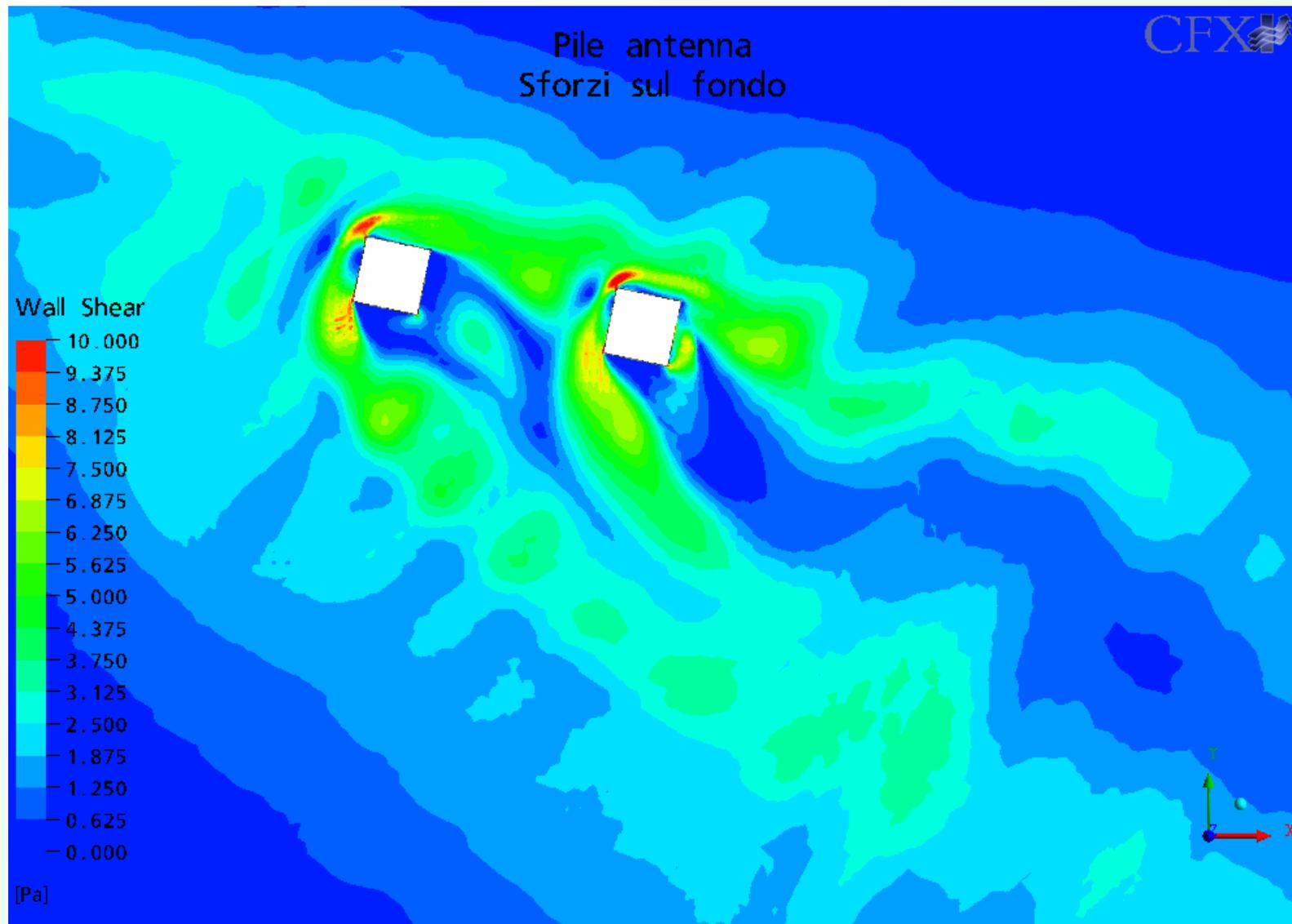
*Linee di corrente particolare (dopo 8 ore)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



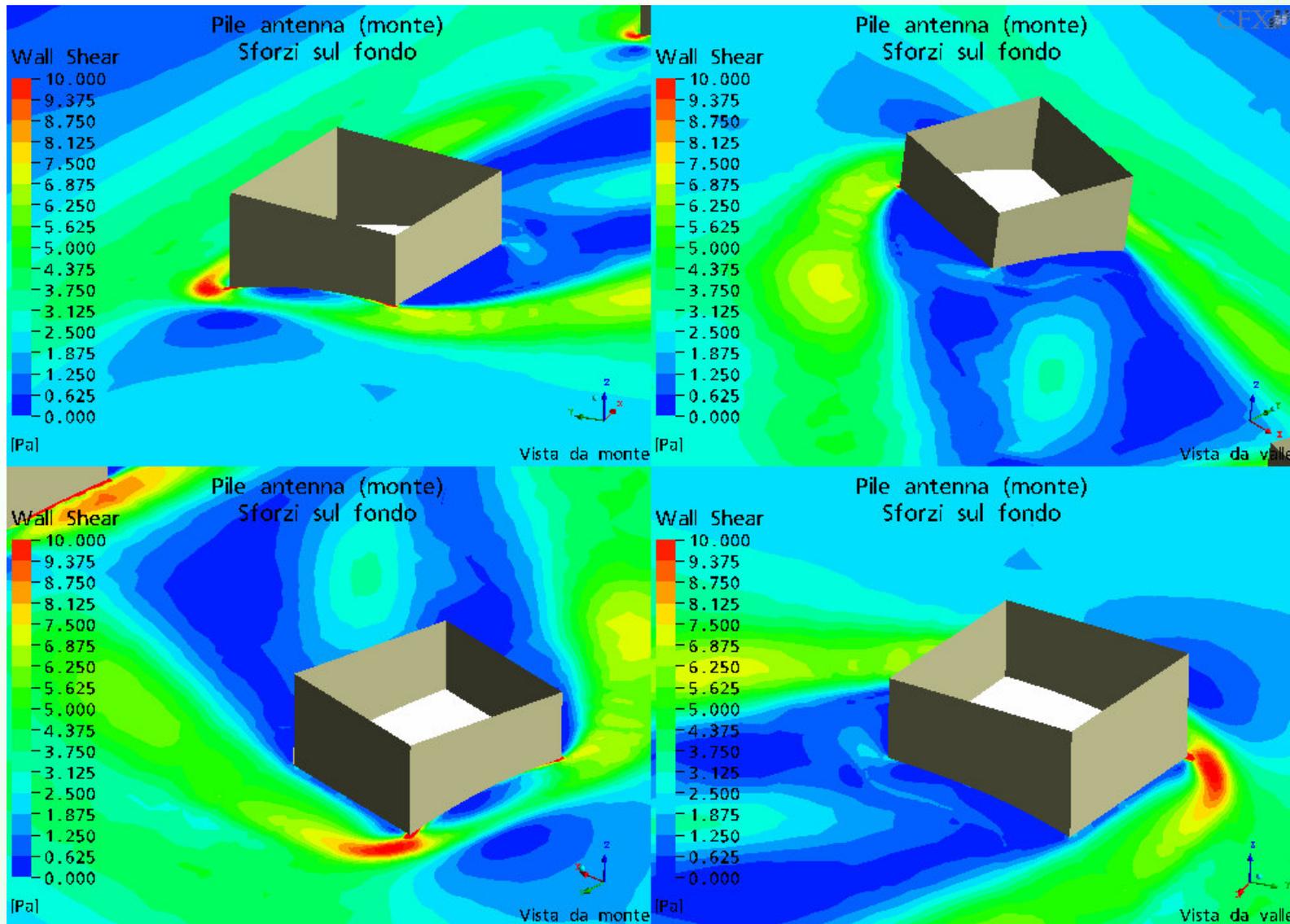
*Sforzi sul fondo particolare (istante iniziale)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



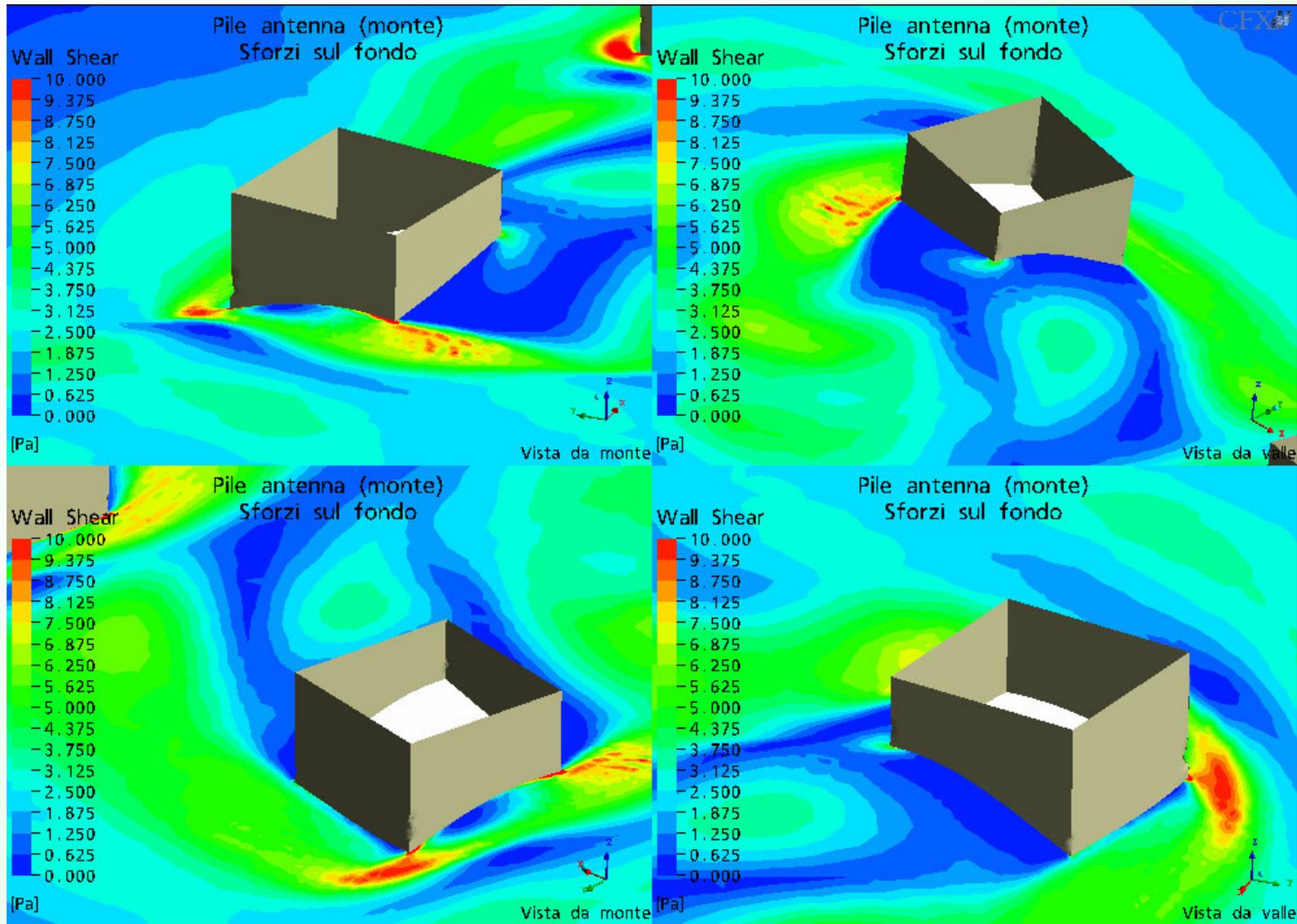
*Sforzi sul fondo particolare (dopo 12 ore)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



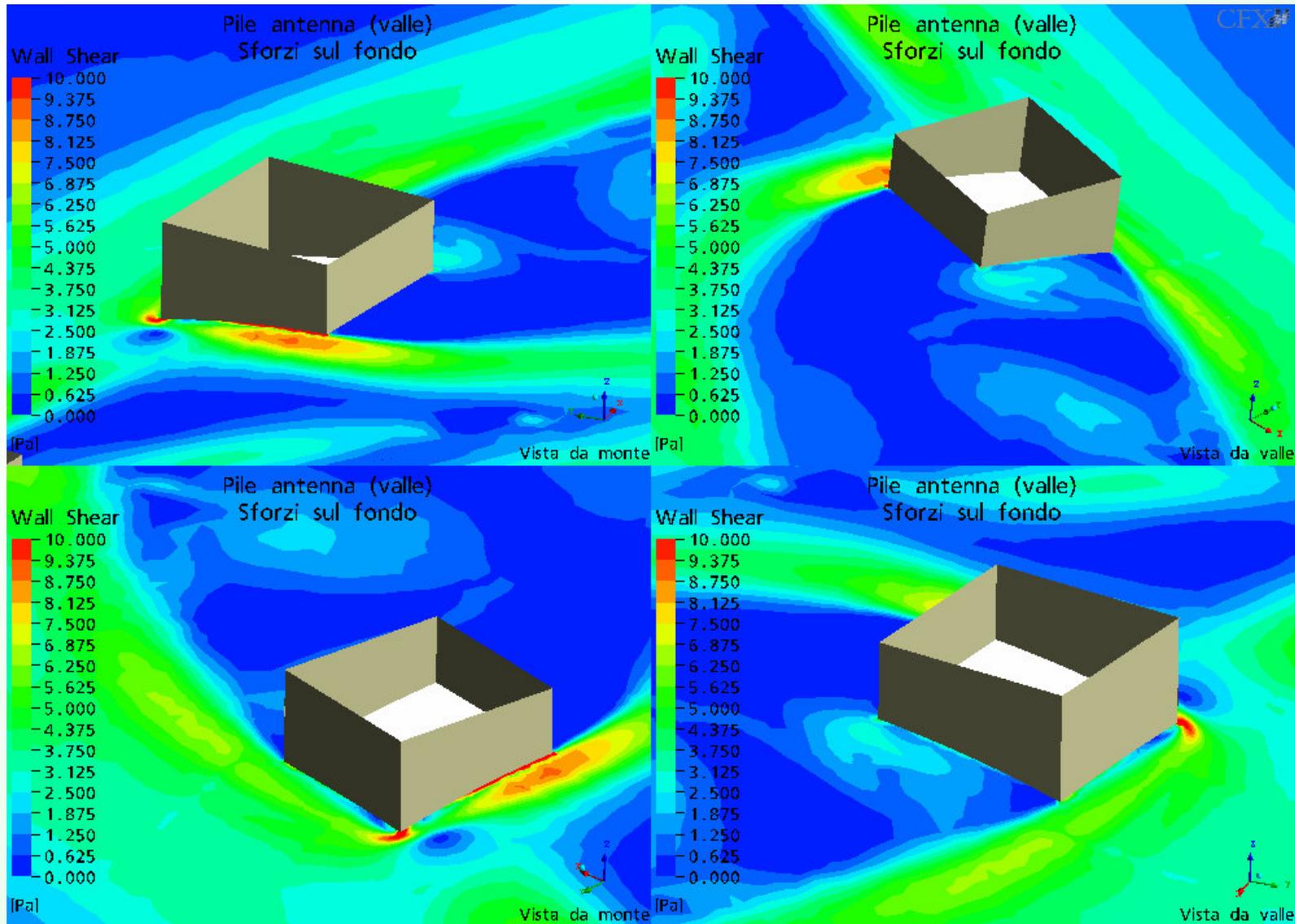
*Sforzi sul fondo particolare (istante iniziale)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



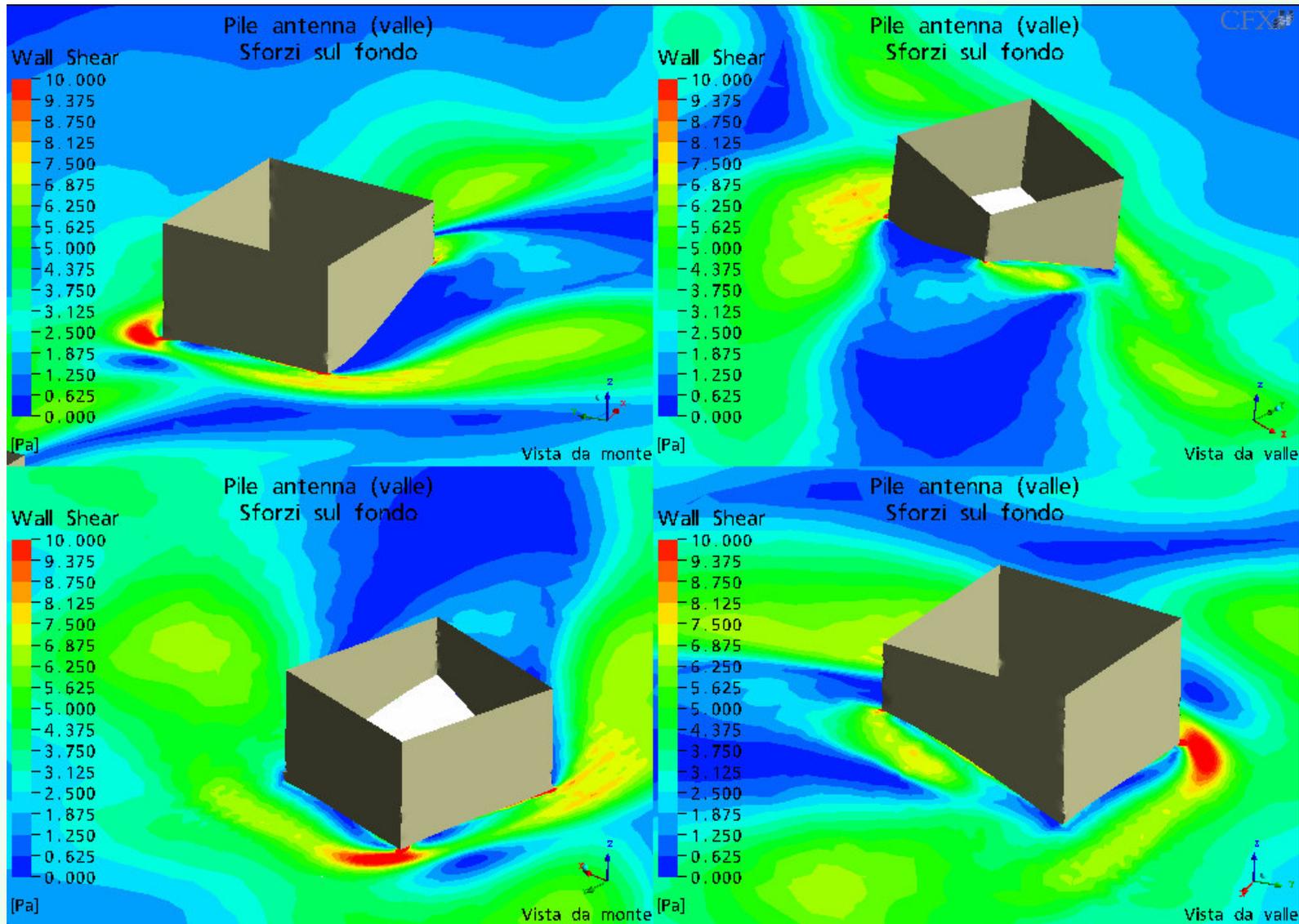
*Sforzi sul fondo particolare (dopo 12 ore)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



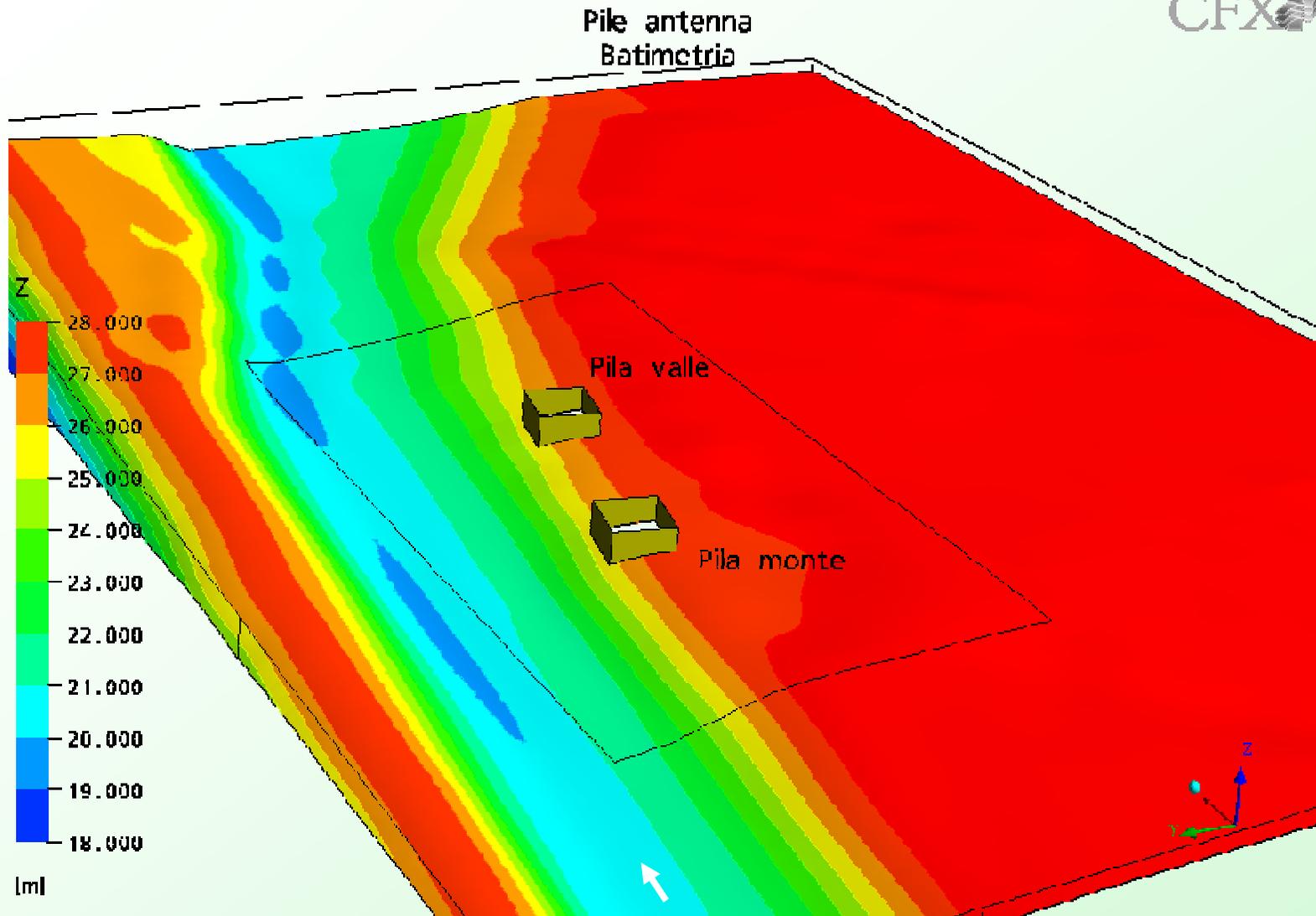
*Sforzi sul fondo particolare (istante iniziale)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



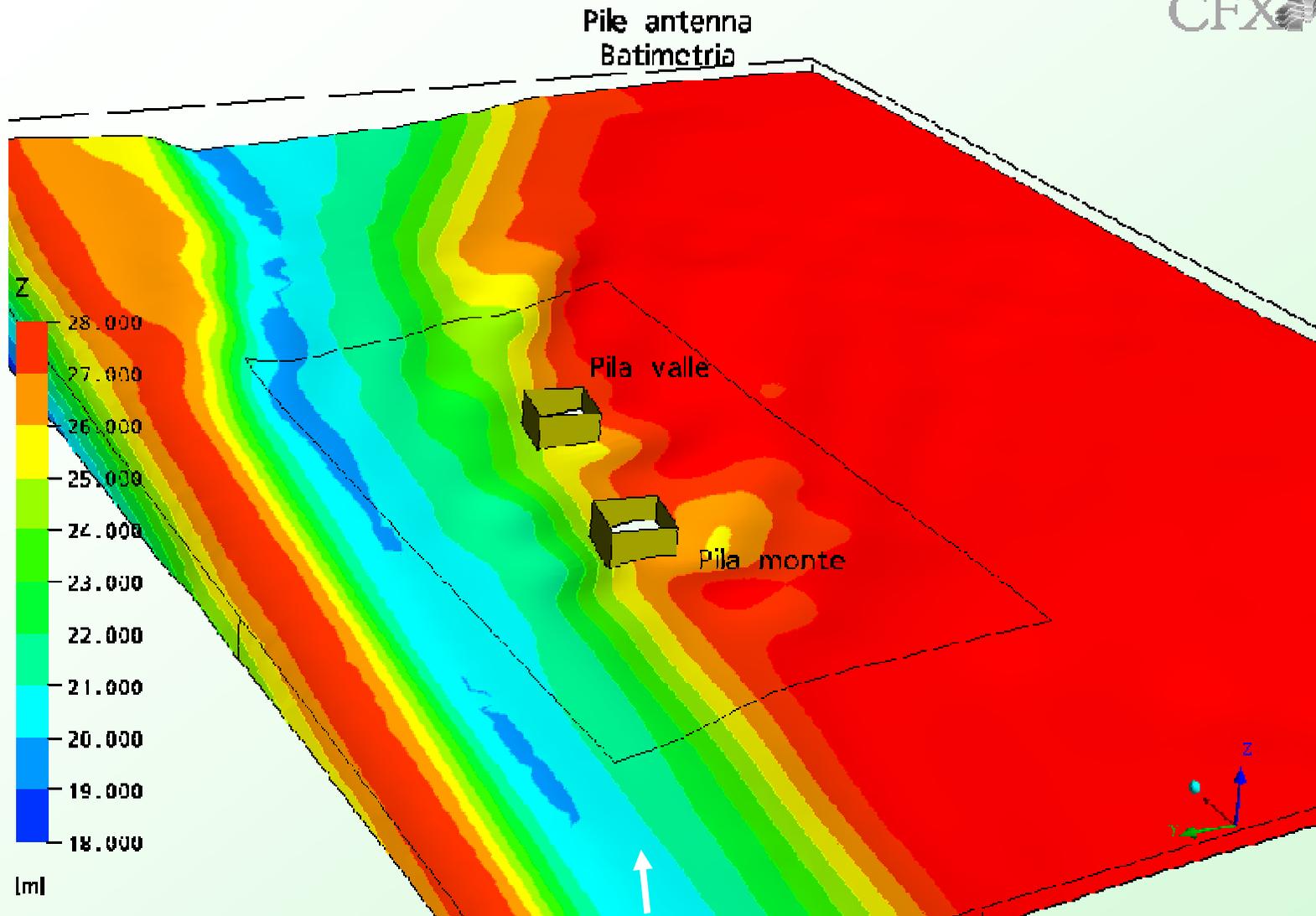
*Sforzi sul fondo particolare (dopo 12 ore)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



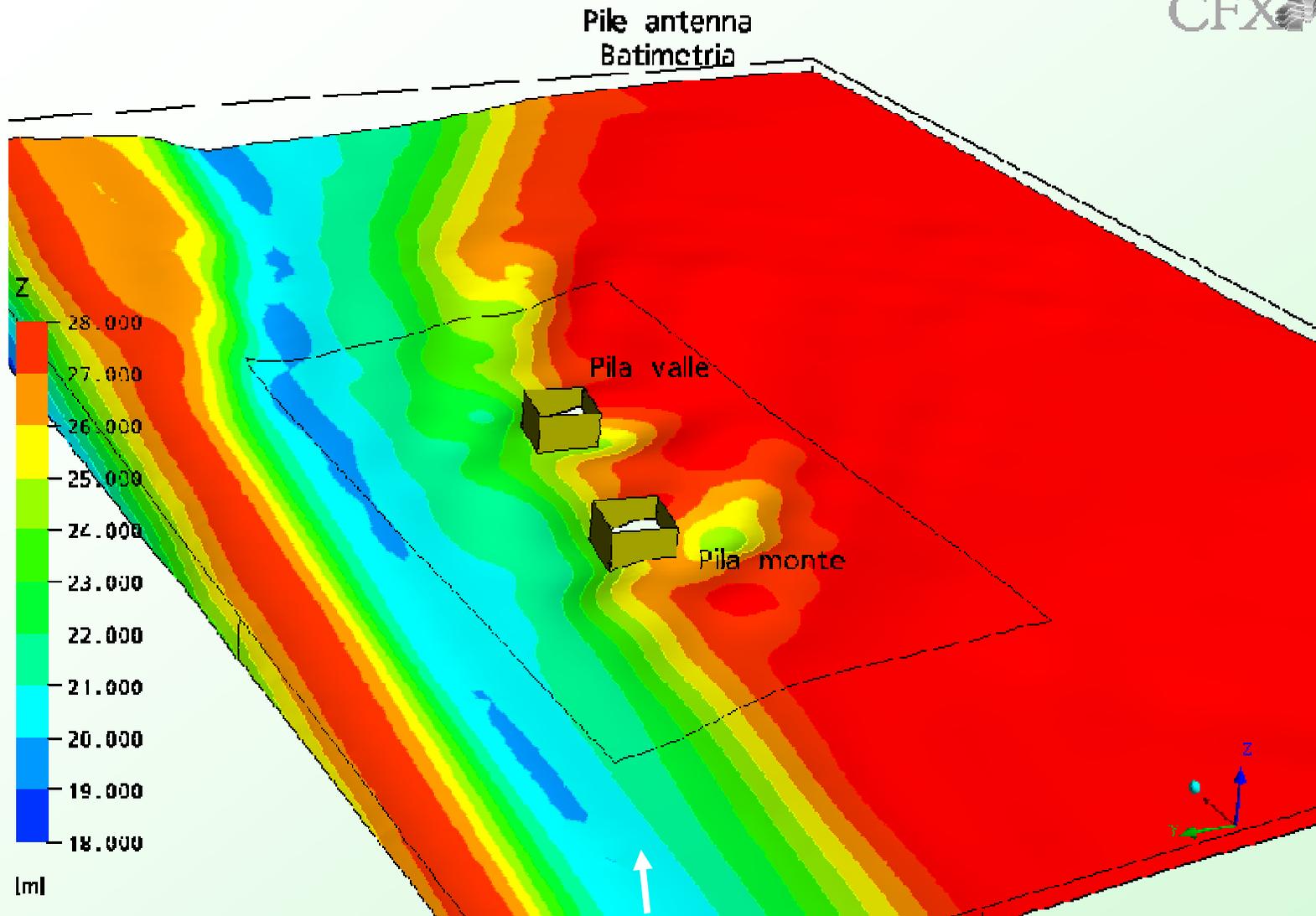
*Batimetria (istante iniziale)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte

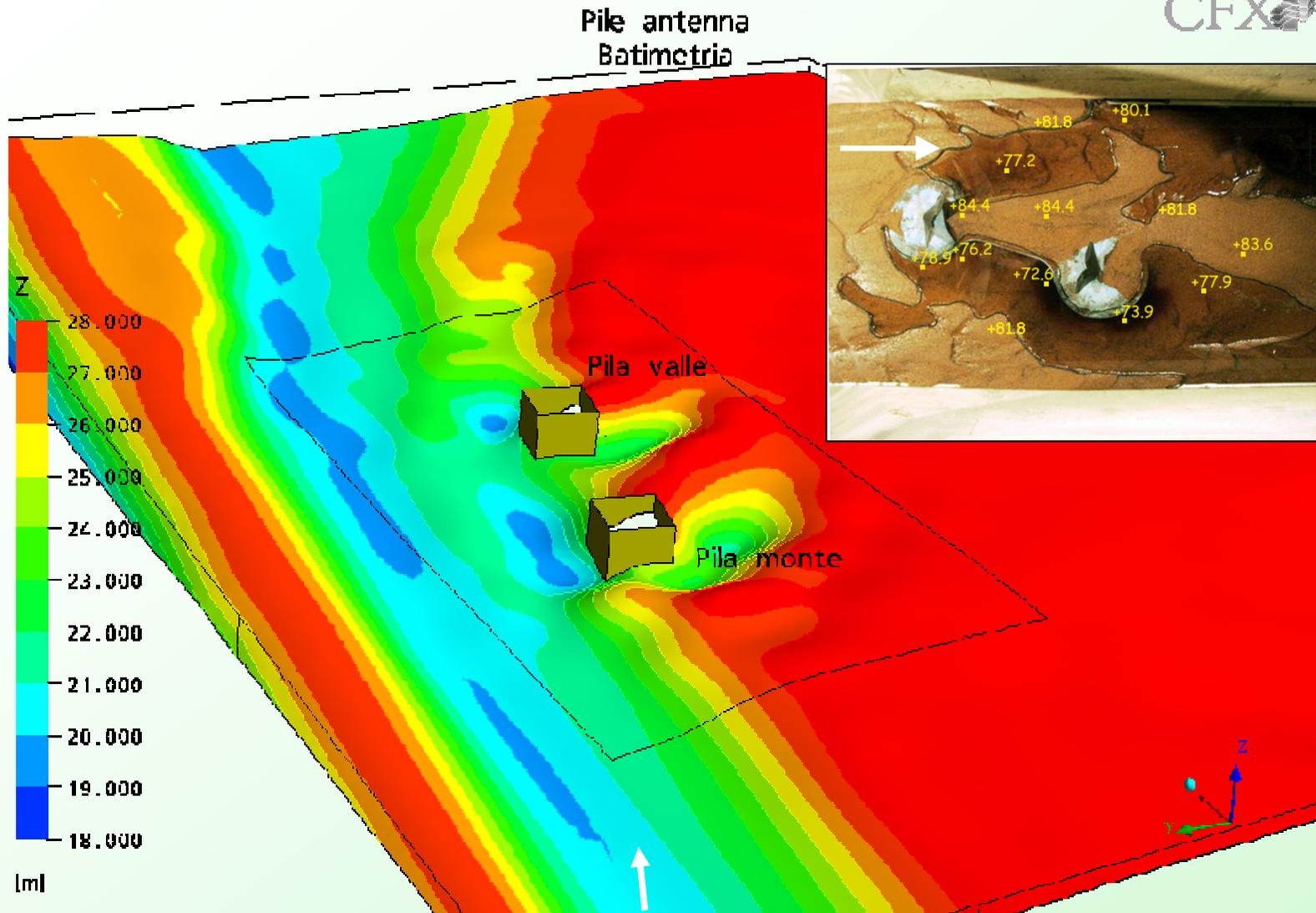
# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)



*Batimetria (passo 2)*

Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE PA)

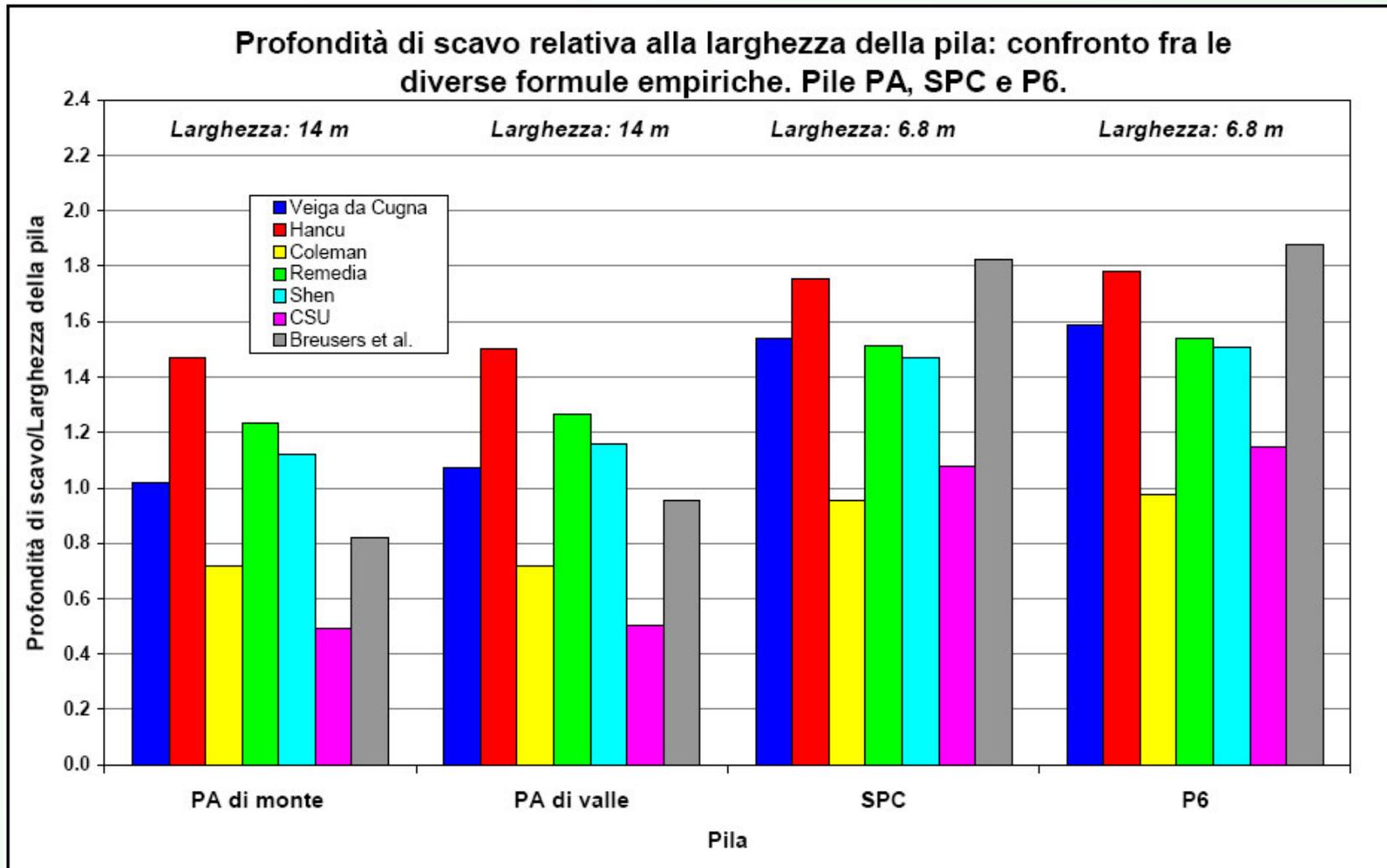


*Batimetria (passo 3)*

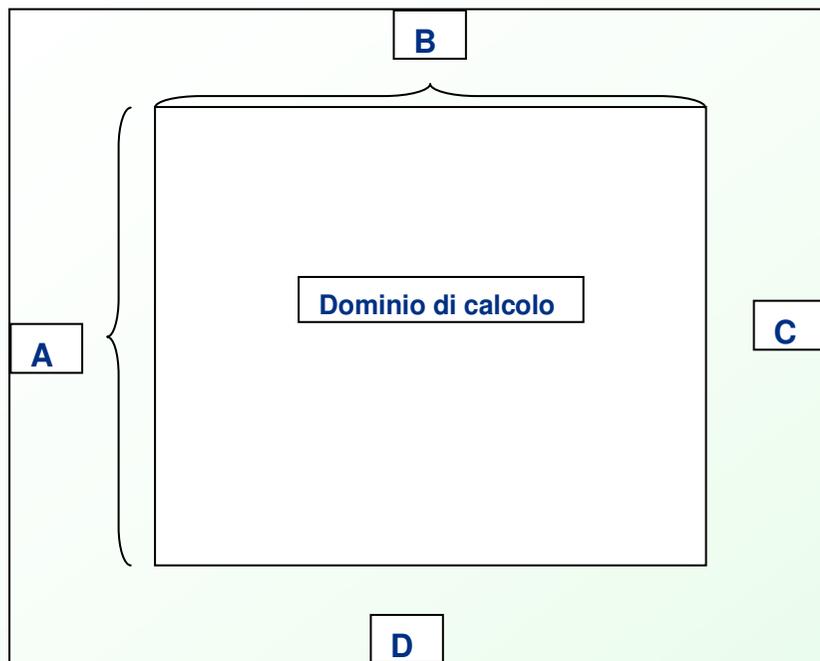
*Profondità massima dello scalzamento: pila di monte 0.54b ; pila di valle 0.43b*

Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte

# CASO DI STUDIO: APPLICAZIONE DELLE FORMULE EMPIRICHE



# Dominio di calcolo PILE in ALVEO e condizioni al contorno

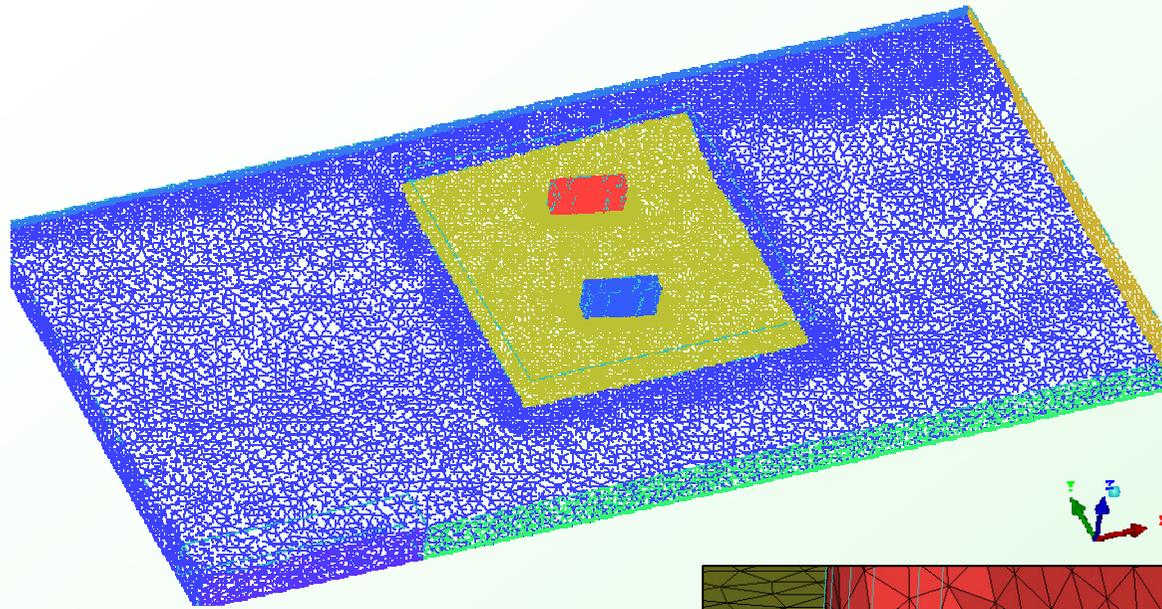


Tratto del lato di ingresso	Lunghezza (m)	Portata (m <sup>3</sup> /s)
Lato A	178	4269.2
Lato B	116	188.7
Totale	-	4457.9

- Lato uscita valle (C): OPENING Pressione statica imposta nulla  
(equivale a imporre le derivate normali di tutte le grandezze nulle)
- Lato uscita DX (D): OUTLET MASSFLOW portata imposta sul lato di uscita 948.3 m<sup>3</sup>/s
- Pareti Pile: WALL parete idraulicamente liscia con funzioni di parete (velocità nulle)
- Fondo alveo: WALL parete non liscia con funzioni di parete (velocità nulle).  
E' stata impostata una rugosità equivalente pari a 0.002m che corrisponde a sabbia mista ghiaia sottile o terra battuta [1]
- Superficie libera: WALL FREE SLIP parete liscia con libero scorrimento (sforzo nullo).

# CASO DI STUDIO

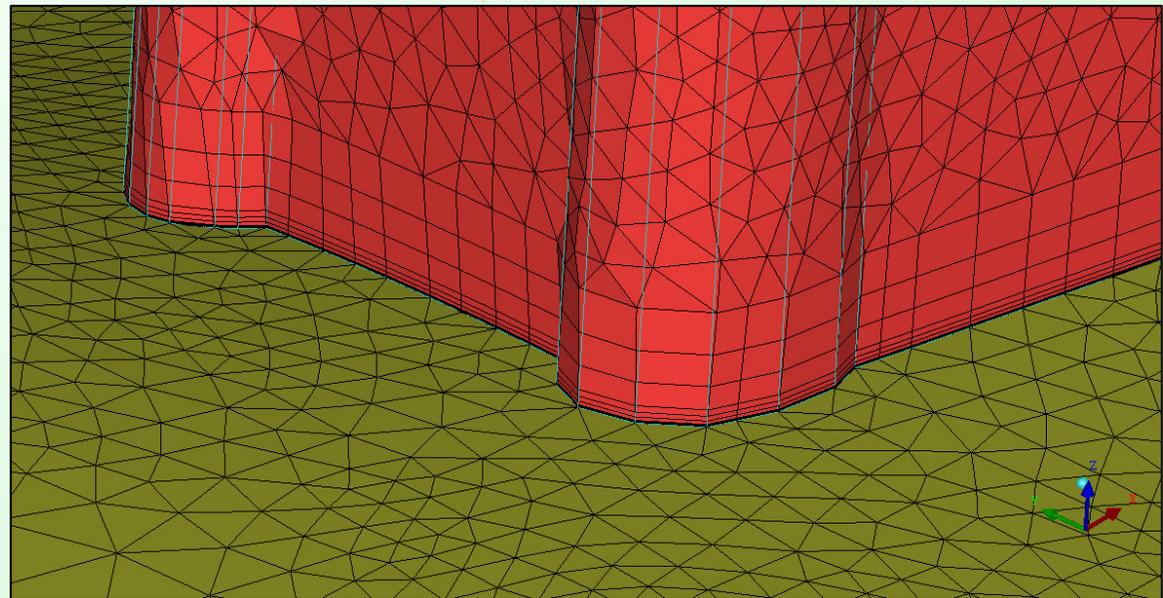
## MODELLAZIONE IDRODINAMICA 3D (CFX-5)



***Mesh di calcolo 3D  
caso Pile in Alveo***

*N° elementi tetraedrici 1413592  
N° elementi prismi 272898  
N° nodi 397011*

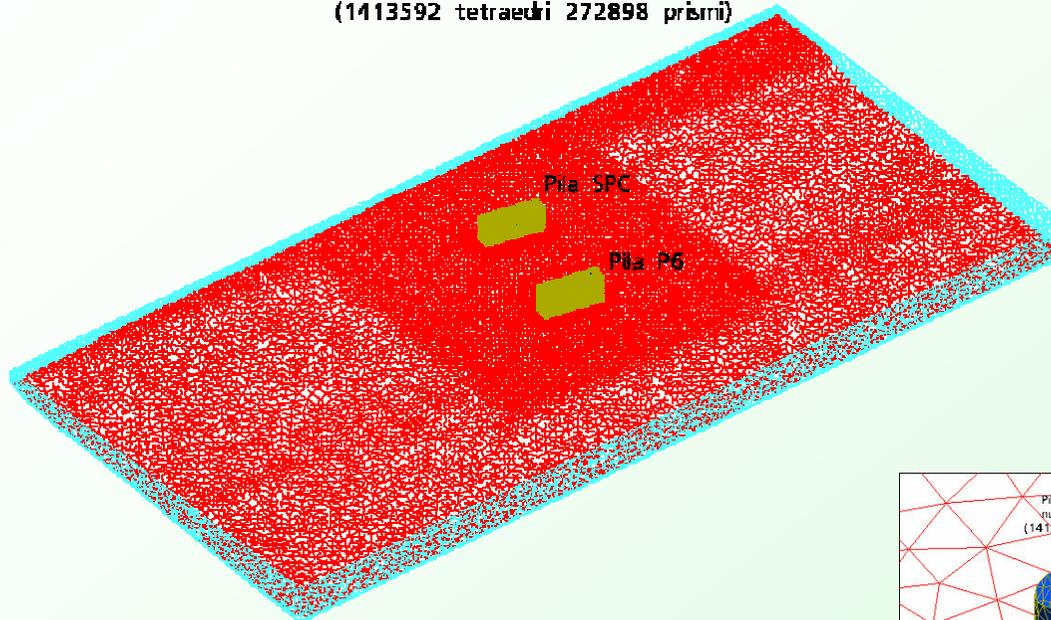
*Mesh di calcolo 3D.  
Dettaglio di una pila.*



# CASO DI STUDIO

## MODELLAZIONE IDRODINAMICA 3D (CFX-5)

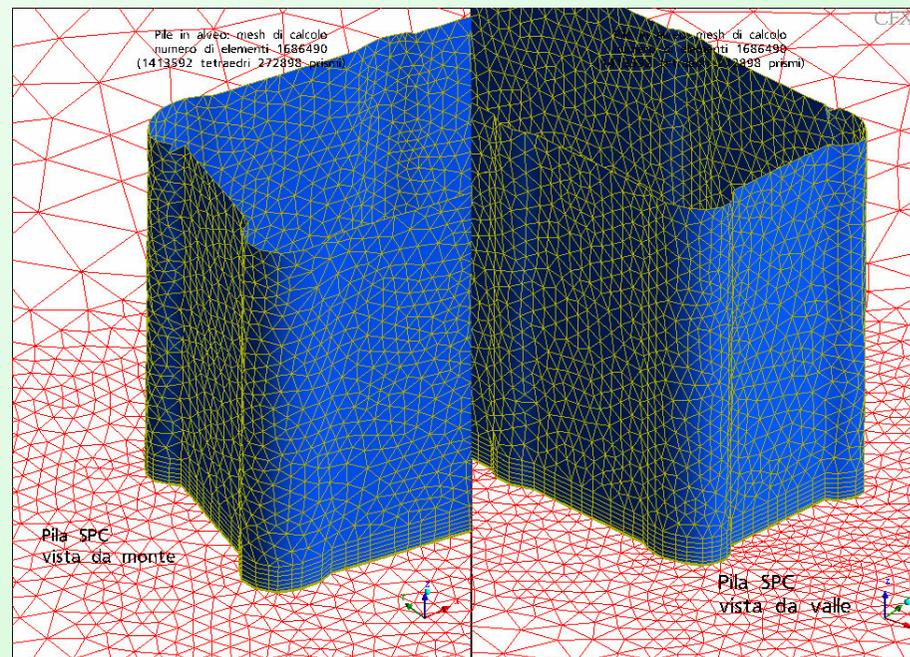
Pile in alveo: mesh di calcolo  
numero di elementi 1686490  
(1413592 tetraedri 272898 prismi)



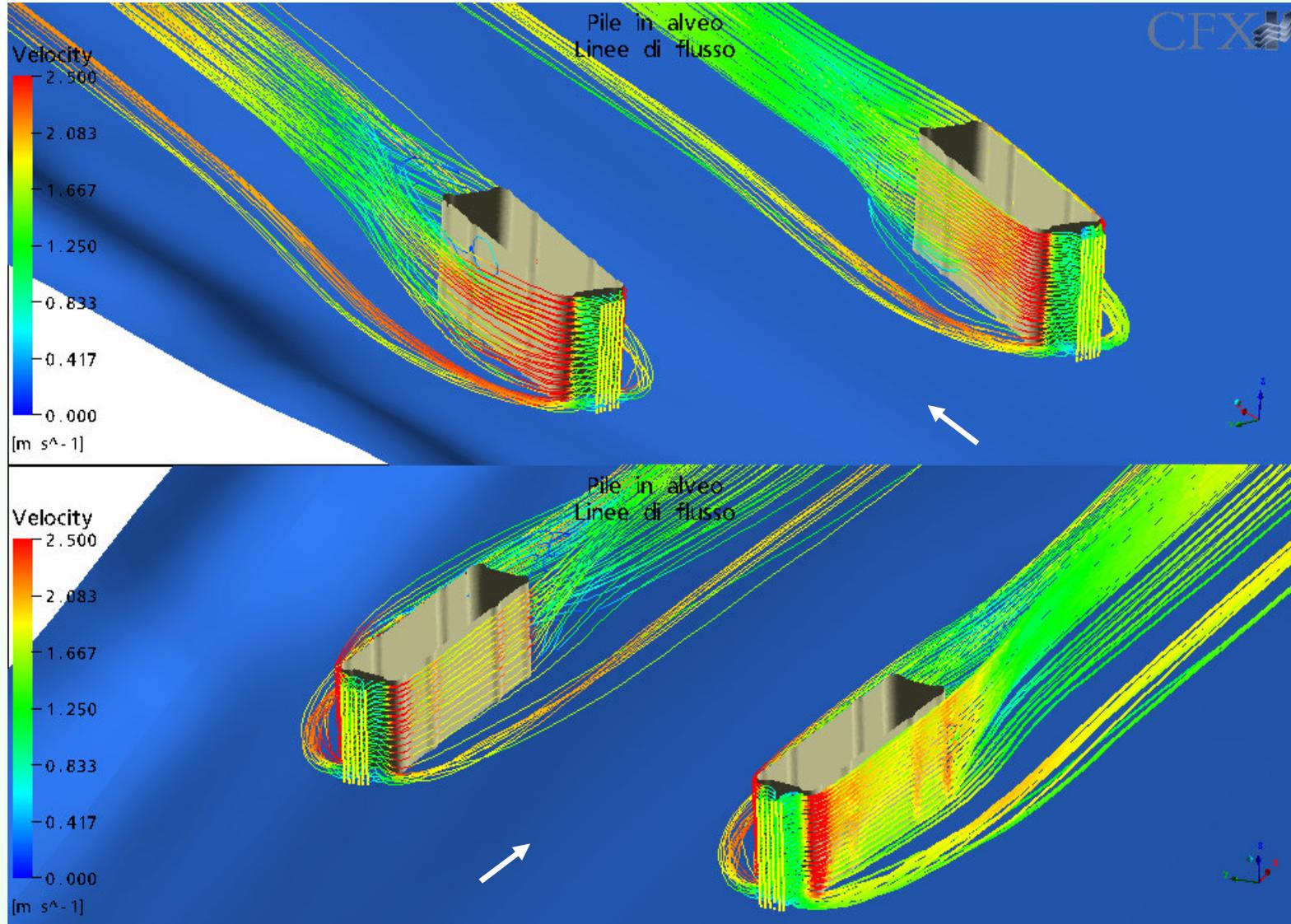
### Mesh di calcolo 3D caso Pile in Alveo

N° elementi tetraedrici 1413592  
N° elementi prismi 272898  
N° nodi 397011

*Mesh di calcolo 3D.  
Dettaglio di una pila.*

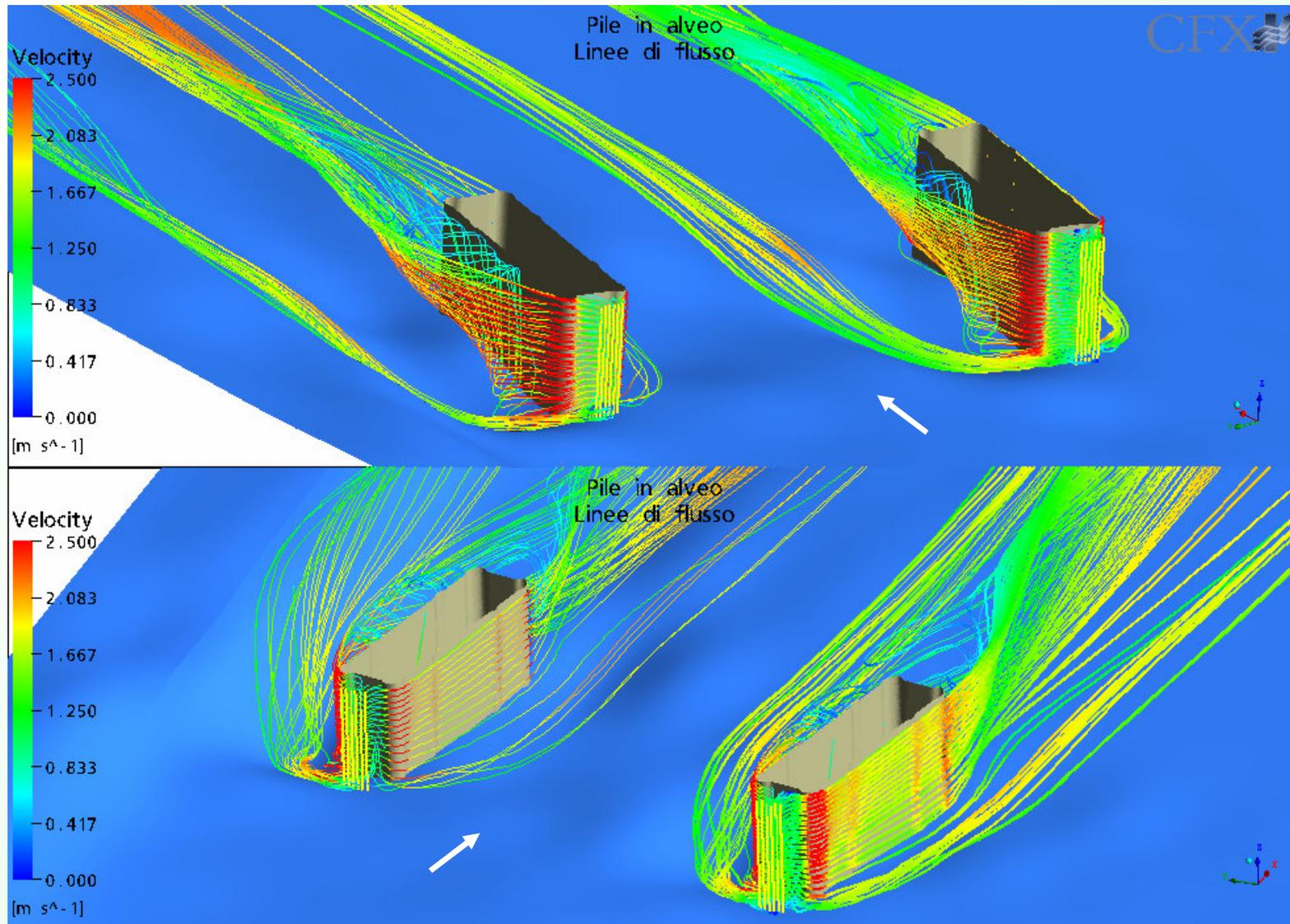


# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE IN ALVEO)



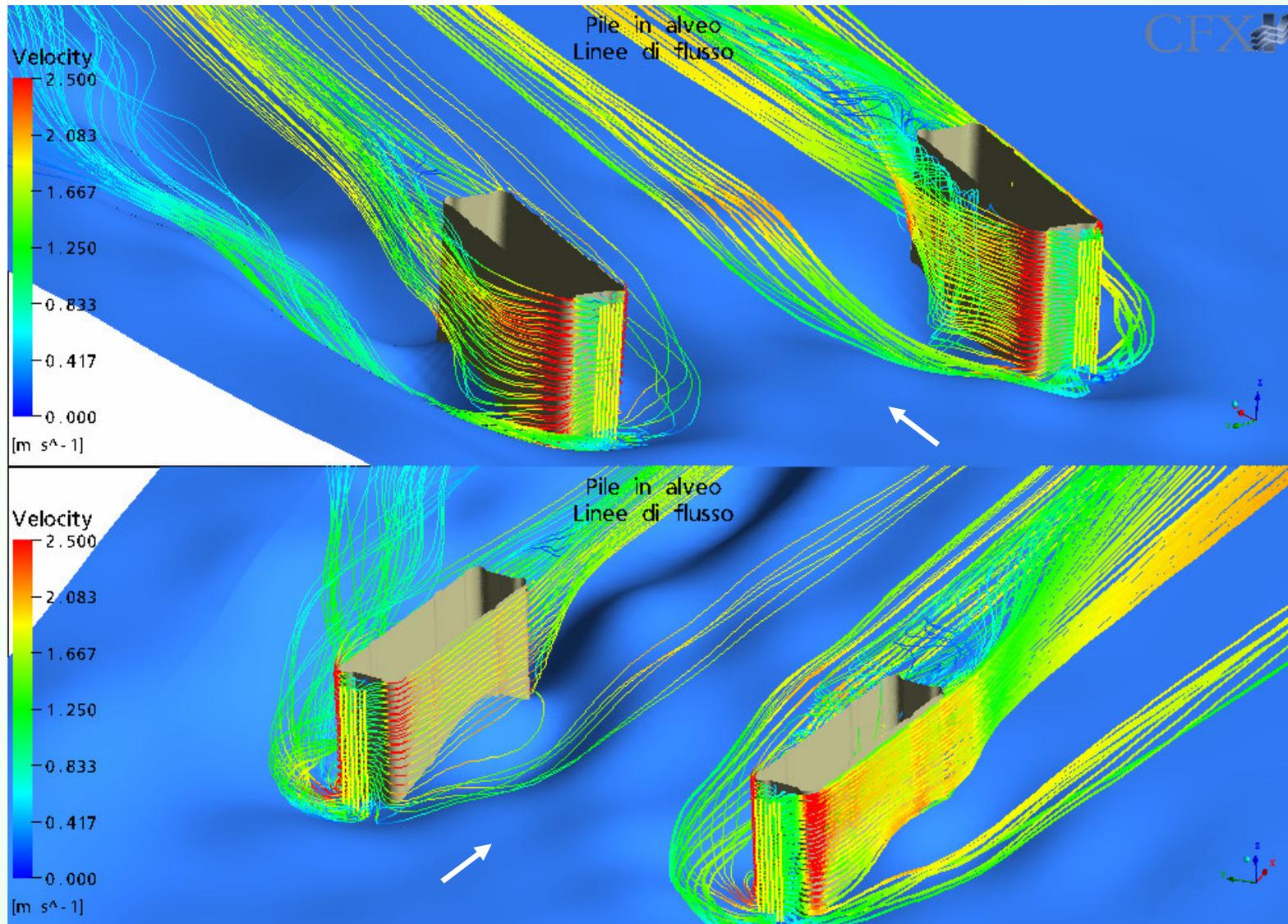
*Linee di corrente (istante iniziale)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE IN ALVEO)



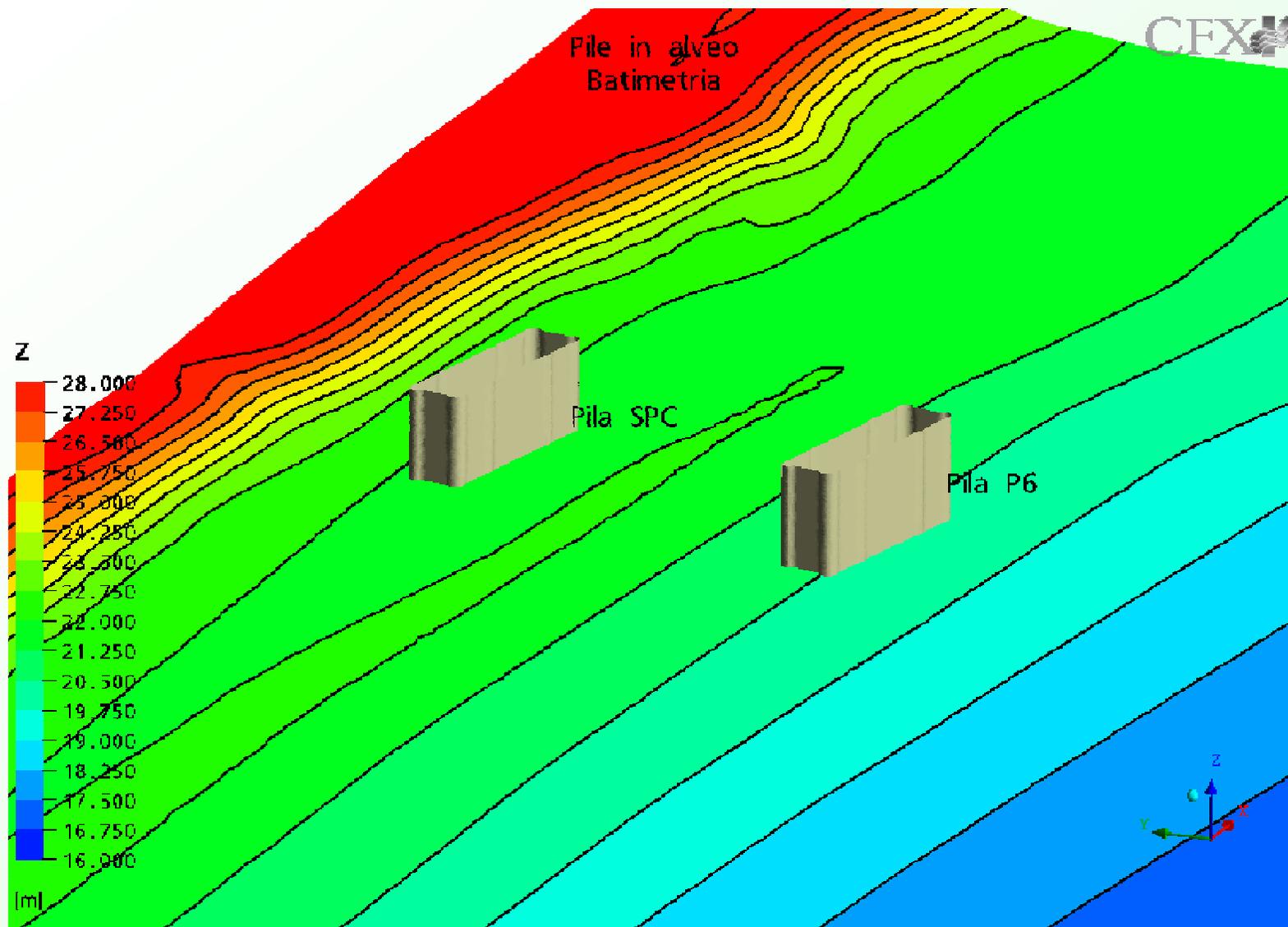
*Linee di corrente (dopo 4 ore)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE IN ALVEO)



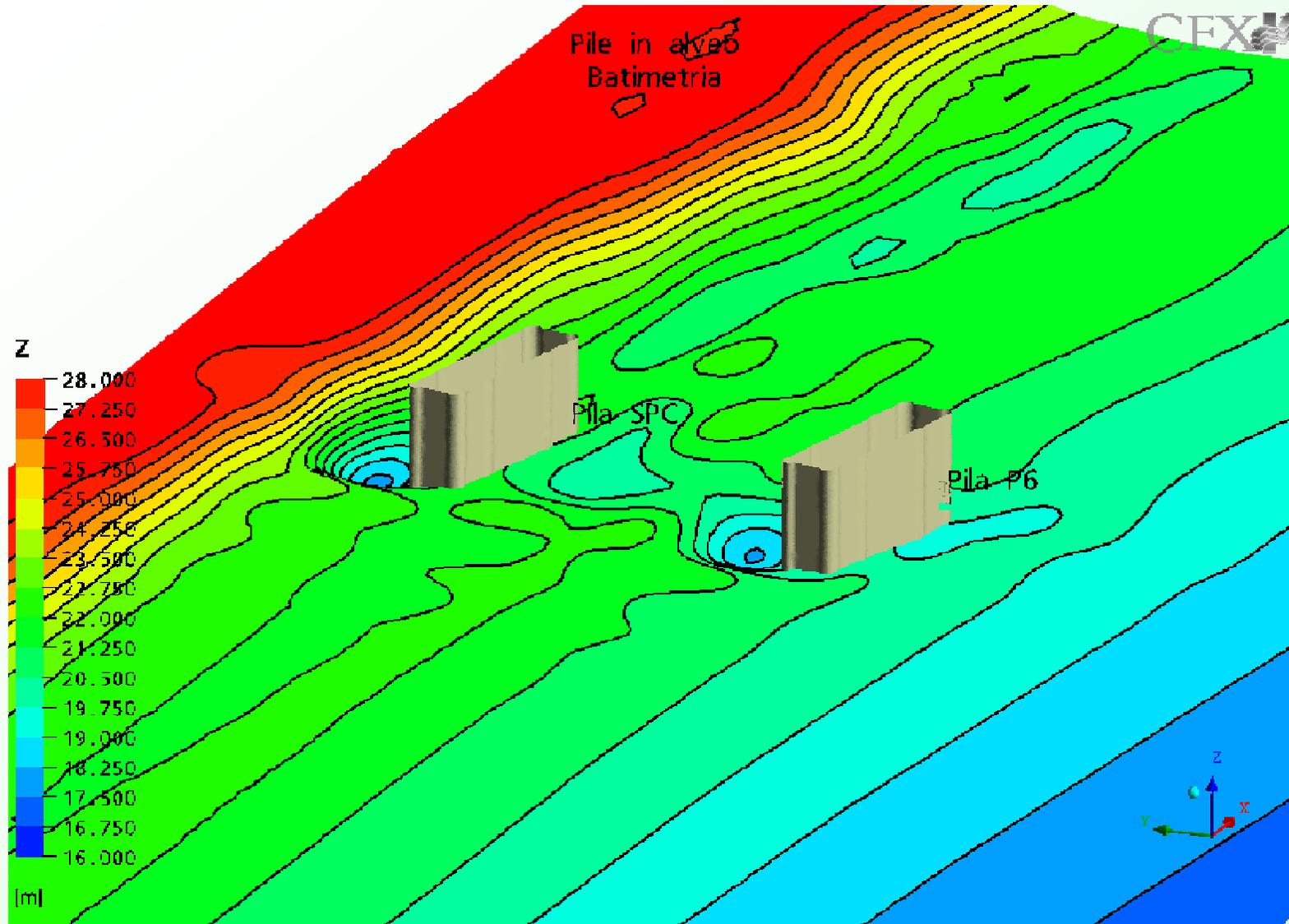
*Linee di corrente (dopo 8 ore)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE IN ALVEO)



*Batimetria (istante iniziale)*

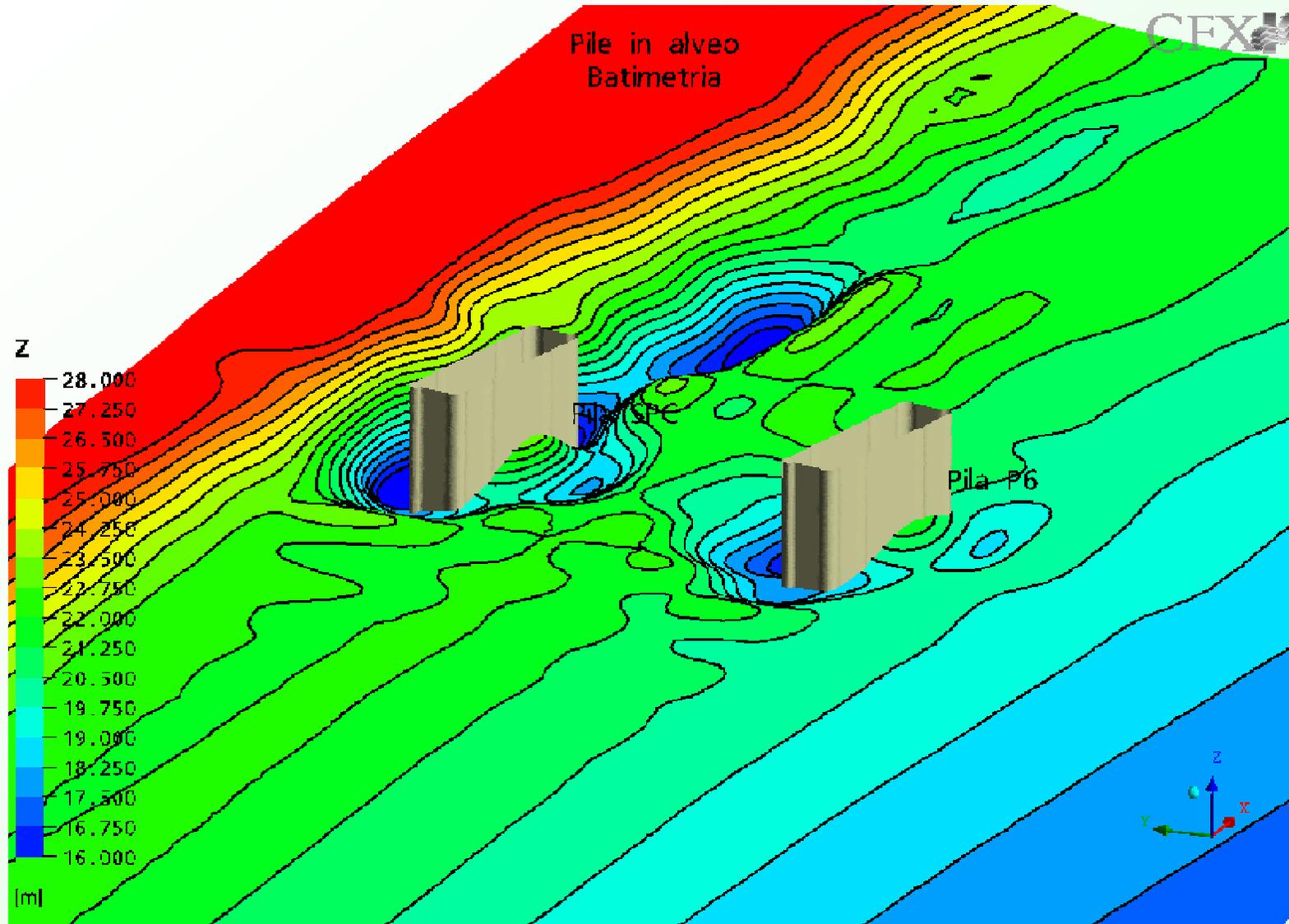
# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE IN ALVEO)



*Batimetria (dopo 4 ore)*

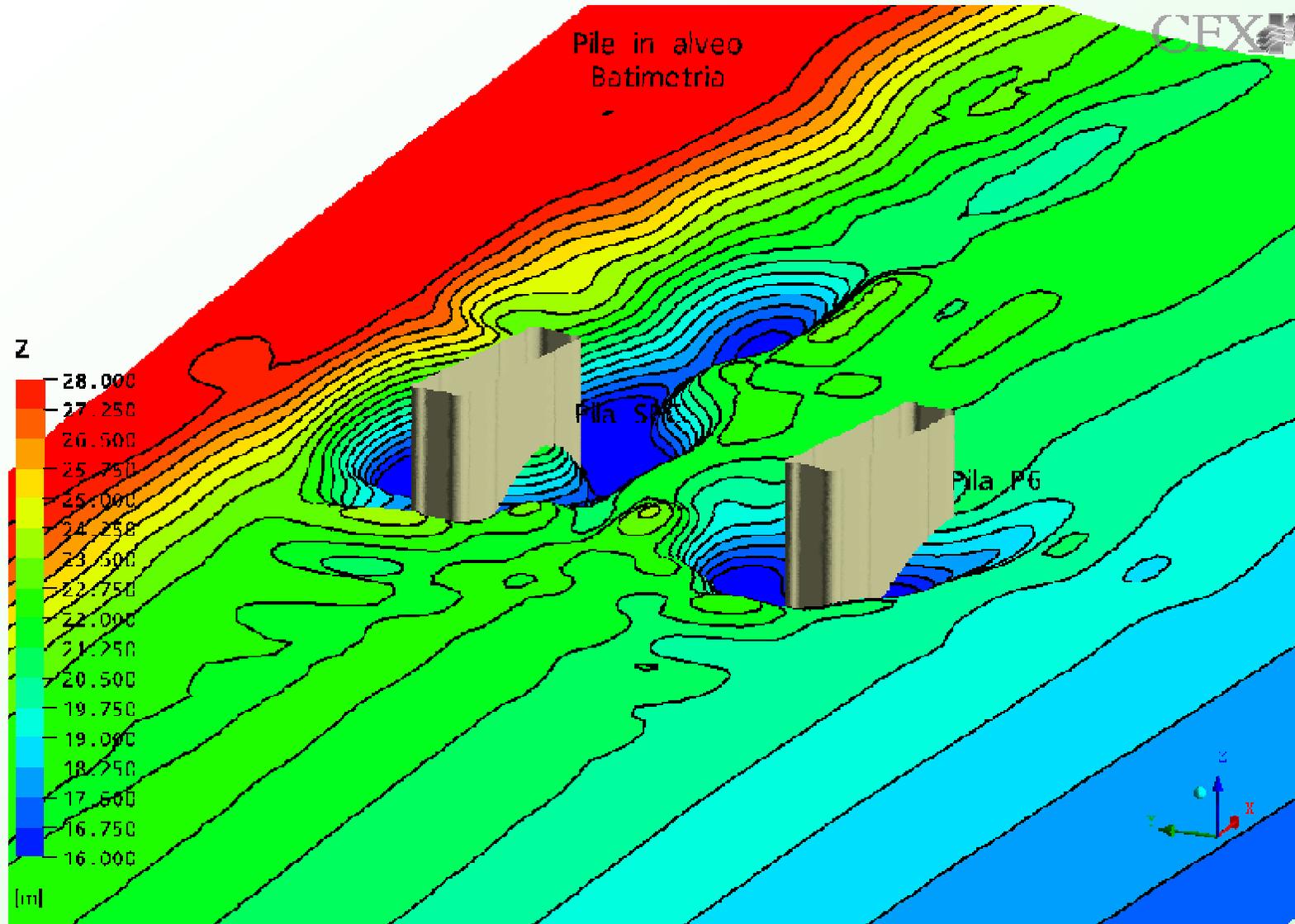
Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE IN ALVEO)



*Batimetria (dopo 8 ore)*

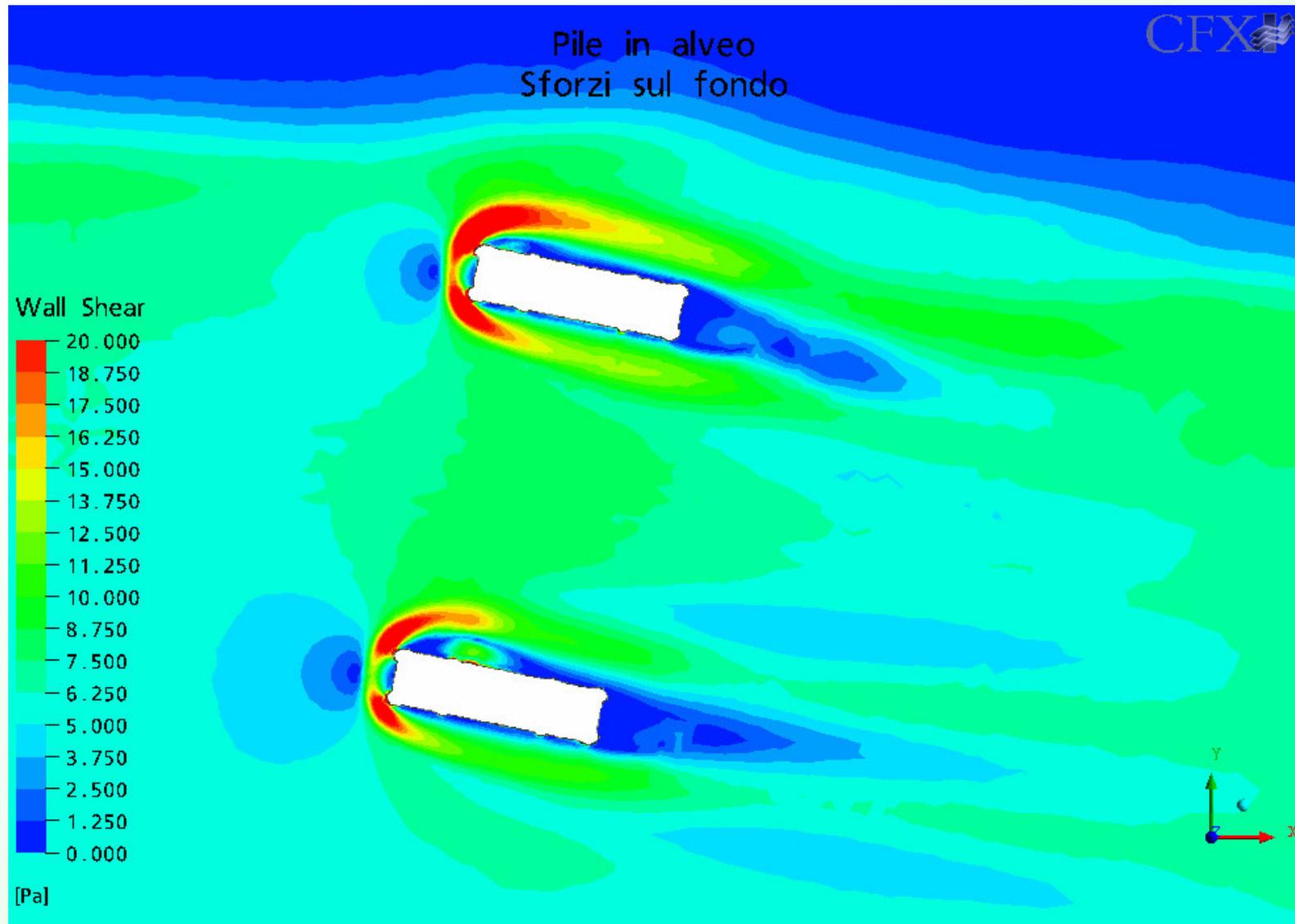
# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE IN ALVEO)



*Batimetria (dopo 20 ore)*

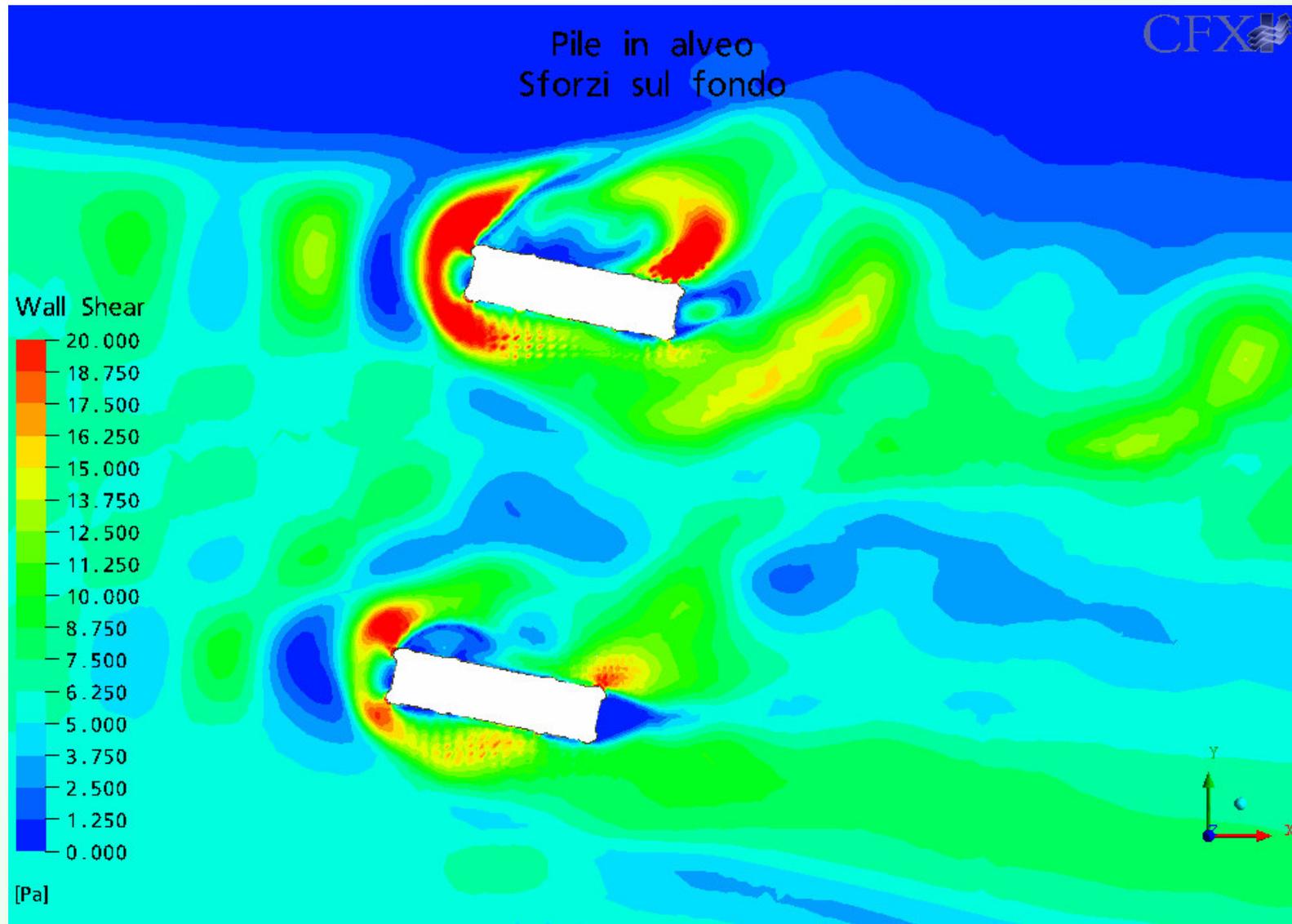
Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE IN ALVEO)



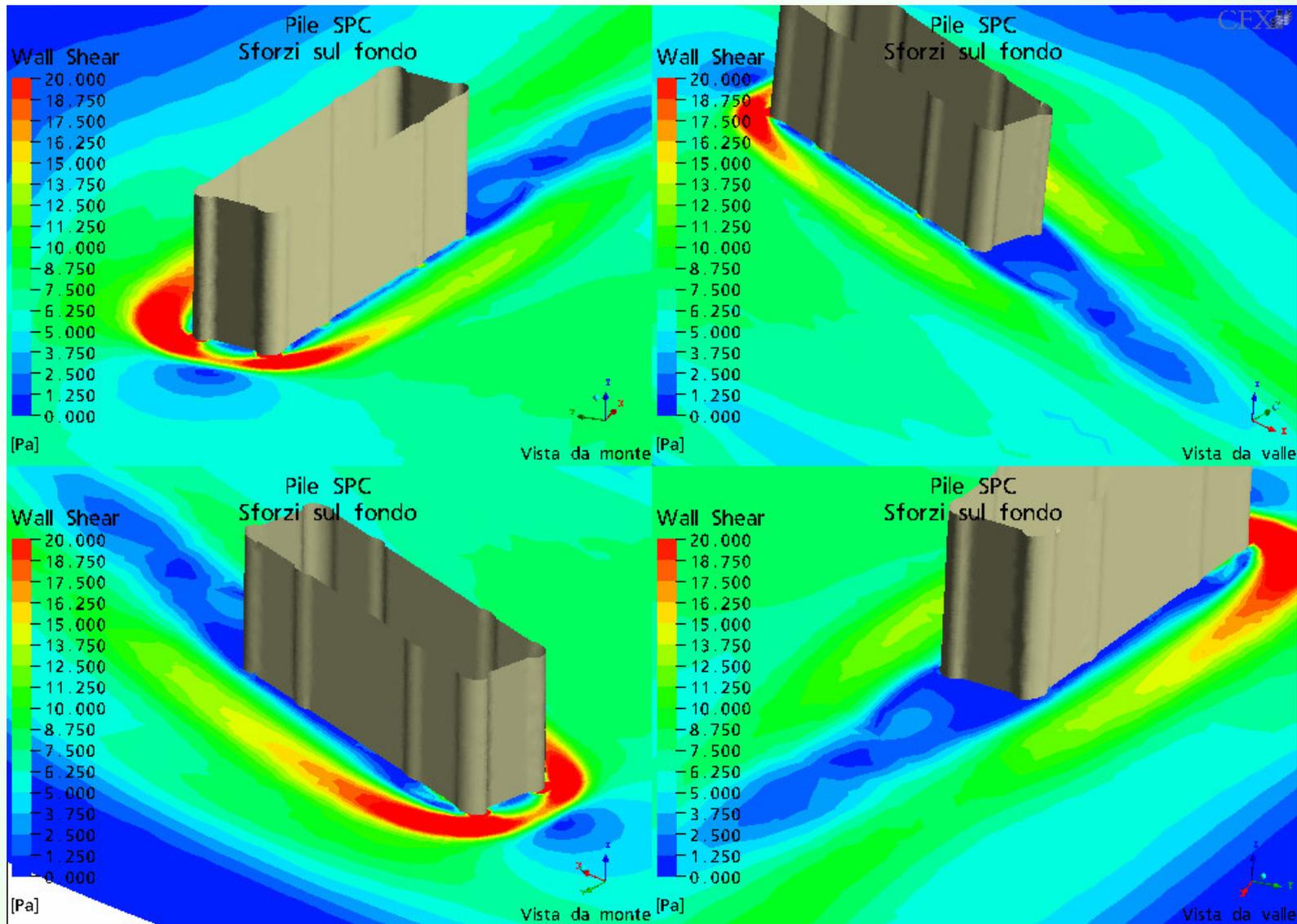
*Sforzi sul fondo particolare (istante iniziale)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE IN ALVEO)



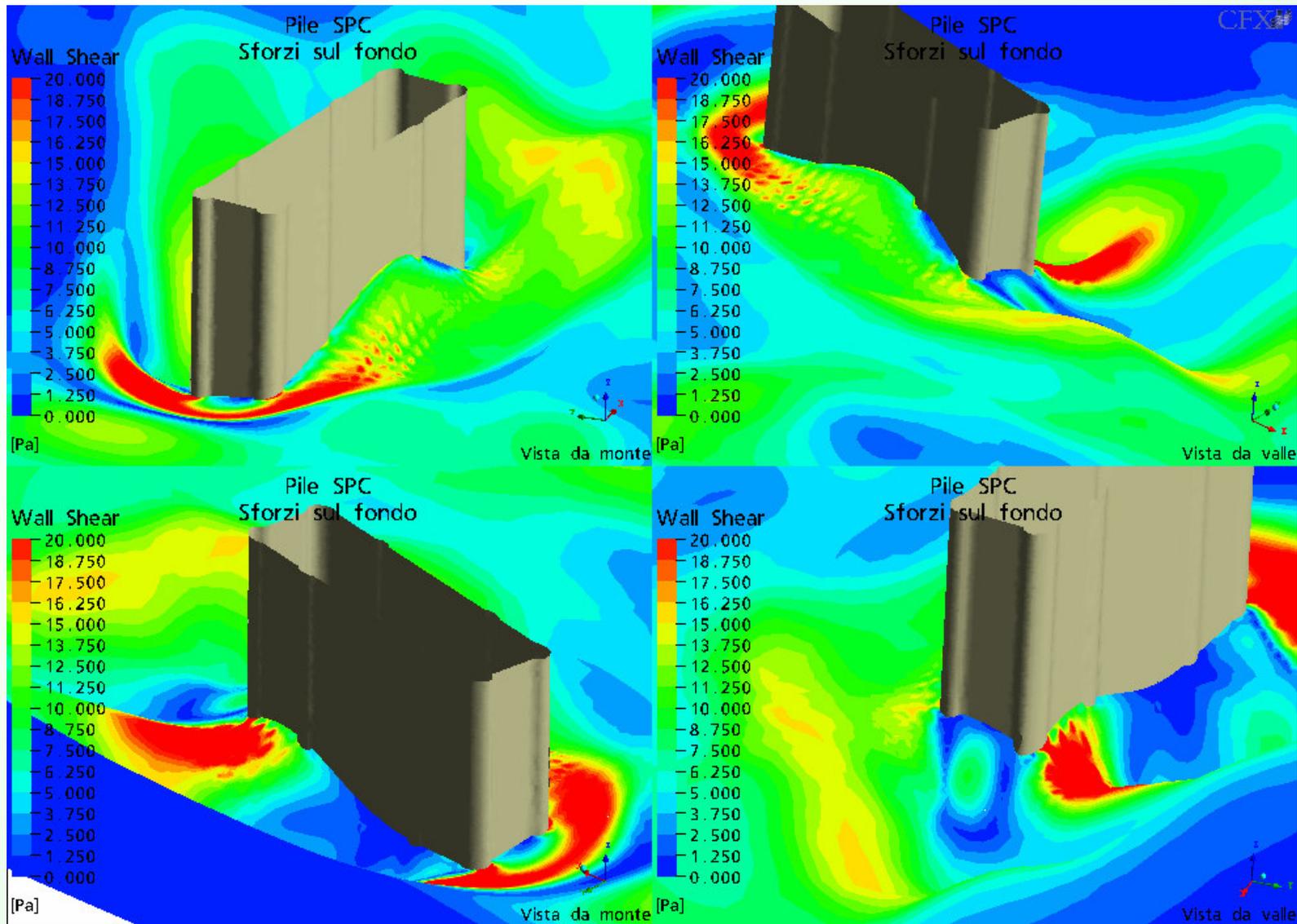
*Sforzi sul fondo particolare (dopo 18 ore)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE IN ALVEO)



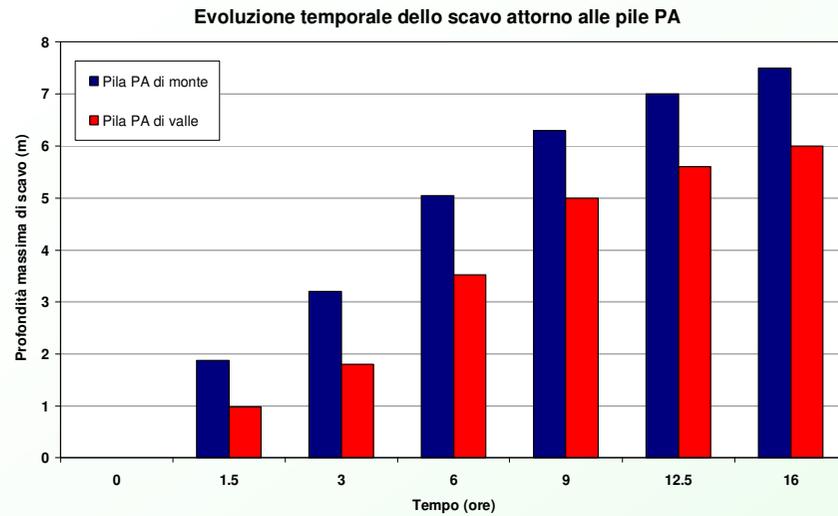
*Sforzi sul fondo particolare (istante iniziale)*

# CASO DI STUDIO: RISULTATI (PILE IN ALVEO)

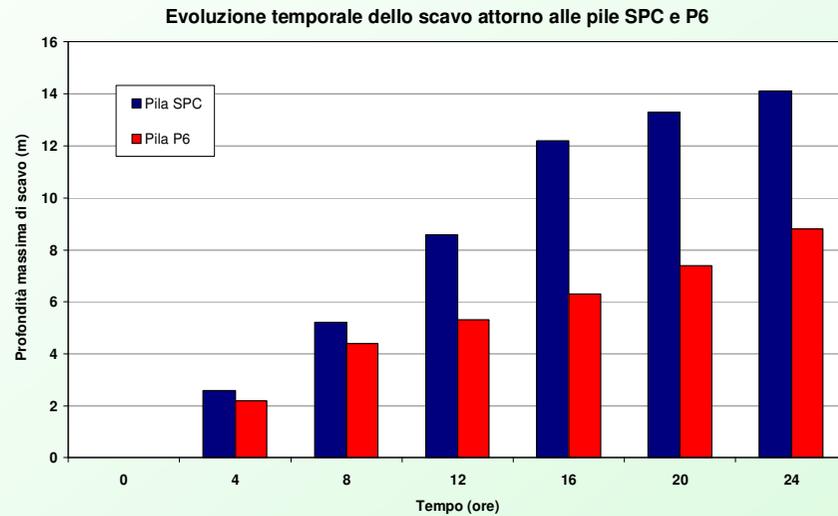
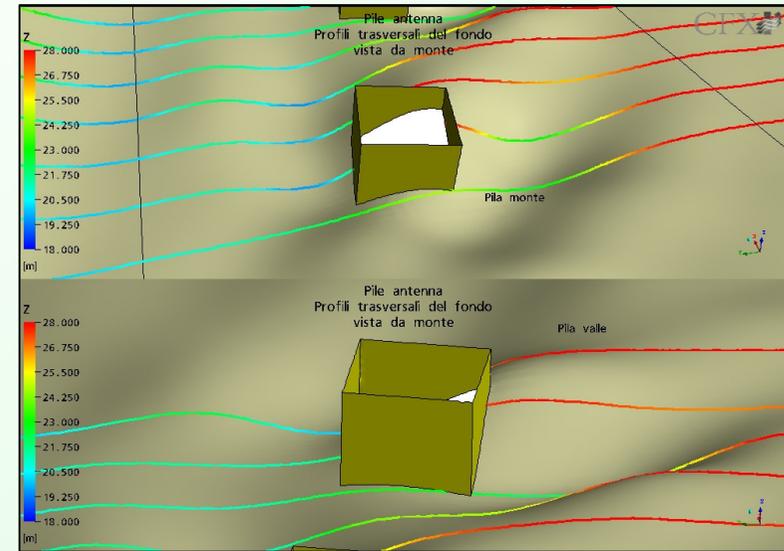


*Sforzi sul fondo particolare (dopo 18 ore)*

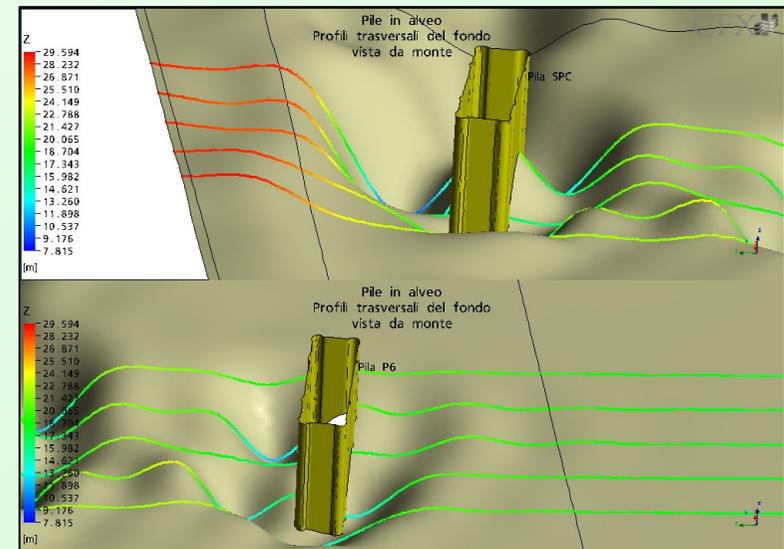
# CASO DI STUDIO: RISULTATI E CONCLUSIONI



*Evoluzione della profondità di scavo attorno alle pile PA dopo 24 ore*



*Evoluzione della profondità di scavo attorno alle pile SPC e P6 dopo 24 ore*



Modellazione numerica avanzata del fenomeno di scalzamento in corrispondenza delle pile di un ponte