

**VALUTAZIONE DELL'IMPATTO SULLA DISPERSIONE TERMICA
DELLE ACQUE DI RAFFREDDAMENTO CON UN MODELLO 3D**

PREMESSA

Si riporta di seguito la relazione di analisi della perturbazione termica in seguito al progetto di trasformazione della Gruppo 4 in ciclo combinato e la contemporanea messa fuori esercizio del Gruppo 3 a olio combustibile denso.

Tale relazione, già presentata in sede di Valutazione d'Impatto Ambientale, riguarda le determinazioni derivanti dalle analisi effettuate con un modello matematico tridimensionale e si accompagna alle analoghe determinazioni effettuate mediante un modello matematico bidimensionale riportate nell'allegato D15_01.

Cliente SOGIN

Oggetto Centrale di Monfalcone
Trasformazione a ciclo combinato
Valutazione dell'impatto sulla dispersione termica delle acque di raffreddamento

Ordine E-mail di attivazione del 4.11.2004

Note Prima emissione

La parziale riproduzione di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta del CESI.

N. pagine 103 **N. pagine fuori testo** 0

Data 28 gennaio 2005

Elaborato STA/RIN - R. Guandalini

Verificato STA - G. Stigliano

Approvato STA - -A. Negri

PUBBLICATO A5019707 (PAD - 640623)

Mod. RAPP v. 01

Indice

1	INTRODUZIONE	7
1.1	Scopo dello studio	7
1.2	Descrizione dell'attività	7
1.3	Documenti di riferimento	8
2	ANALISI DELLE CONDIZIONI INFLUENZANTI LA DISPERSIONE TERMICA	9
2.1	Considerazioni generali	9
2.2	Condizioni di esercizio	9
2.2.1	... Assetto attuale della centrale	9
2.2.2	... Assetto futuro a cicli combinati della centrale	10
2.2.3	... Condizioni relative al prelievo delle acque di raffreddamento	10
2.2.4	... Condizioni relative allo scarico delle acque di raffreddamento	11
2.2.5	... Considerazioni relative al contributo dello scarico della Cartiera del Timavo	11
2.3	Caratteristiche ambientali e del territorio	12
2.3.1	... Dati relativi alla morfologia dell'alveo ed alla batimetria	13
2.3.2	... Dati relativi al flusso idrico	13
2.3.3	... Dati relativi alle condizioni di temperatura e salinità dei diversi corpi idrici	18
2.3.4	... Dati relativi alle condizioni meteorologiche	19
2.3.5	... Dati relativi all'andamento della marea	20
3	DEFINIZIONE DELLA SCHEMATIZZAZIONE NUMERICA	23
3.1	Considerazioni generali	23
3.2	Definizione delle condizioni di analisi	23
3.3	Definizione del reticolo di calcolo e delle condizioni iniziali	24
4	ANALISI DELLA DISPERSIONE TERMICA	30
4.1	Considerazioni preliminari	30
4.2	Analisi della dispersione termica nella configurazione attuale	30
4.2.1	... Considerazioni generali	30
4.2.2	... Stato stazionario di inizializzazione: analisi dei risultati	31
4.2.3	... Simulazione del transitorio di marea: analisi dei risultati nelle condizioni di minimo crescente	32
4.2.4	... Simulazione del transitorio di marea: analisi dei risultati nelle condizioni di massimo livello	55
4.3	Analisi della dispersione termica nella configurazione futura a cicli combinati	67
4.3.1	... Considerazioni generali	67
4.3.2	... Stato stazionario di inizializzazione: analisi dei risultati	67
4.3.3	... Simulazione del transitorio di marea: analisi dei risultati nelle condizioni di minimo crescente	78
4.3.4	... Simulazione del transitorio di marea: analisi dei risultati nelle condizioni di massimo livello	91
5	CONCLUSIONI	103

Indice delle figure

fig. 2.1- Area del bacino Lisert-Timavo interessata dallo scarico della Centrale di Monfalcone, con l'indicazione delle sezioni considerate nello studio	14
fig. 2.2 – Vista in pianta dell'opera di scarico.....	15
fig. 2.3 – Vista in sezione dell'opera di scarico	16
fig. 2.4 - Ciclo delle acque di raffreddamento e di processo impiegate nella cartiera del Timavo	17
fig. 2.5 - Andamento della temperatura media all'opera di presa della centrale Endesa	19
fig. 2.6 – Stazione anemometrica di Ronchi dei Legionari. Frequenze medie annuali di vento (periodo 1967-1997)	21
fig. 2.7 - WXTide32. Andamento mareale a Trieste del 23/24 luglio 2003	22
fig. 2.8 - Livello di marea ricostruito dalle componenti armoniche	22
fig. 3.1 - Reticolo di calcolo generato per il modello 3D	27
fig. 3.2 - Particolare del reticolo di calcolo 3D: zona di scarico della centrale.....	28
fig. 3.3 - Particolare del reticolo di calcolo 3D: confluenza del Locavaz e del Timavo	28
fig. 3.4 - Particolare del reticolo di calcolo 3D: confluenza tra i canali Lisert, Tavoloni e Moschenizze.....	29
fig. 3.5 - Particolare del reticolo di calcolo 3D: zona di foce del Timavo	29
fig. 4.1 - Assetto attuale.Stato stazionario a pieno carico. Andamento della velocità (m/s)	33
fig. 4.2 - Assetto attuale.Stato stazionario a pieno carico. Particolari del campo di moto nella zona dello scarico della Centrale e nella zona di confluenza con il fiume Timavo.....	34
fig. 4.3 - Assetto attuale.Stato stazionario a pieno carico. Andamento della elevazione rispetto al medio mare (m).....	35
fig. 4.4 - Assetto attuale. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della temperatura (°C)	36
fig. 4.5 - Assetto attuale.Stato stazionario a pieno carico. Andamento della temperatura (°C). Particolare della zona della foce	37
fig. 4.6 - Assetto attuale. Stato stazionario a pieno carico. Andamento dei gradienti di temperatura (°C)	38
fig. 4.7 - Assetto attuale. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della salinità (g/l).....	39
fig. 4.8 - Assetto attuale. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della salinità (g/l). Particolare della zona della foce	40
fig. 4.9 - Assetto attuale. Stato stazionario a pieno carico. Andamento dei gradienti di salinità (g/l)	41
fig. 4.10 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento della velocità (m/s).....	44
fig. 4.11 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 2 (m/s)	45
fig. 4.12 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 5 (m/s)	46
fig. 4.13 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 8 (m/s)	47
fig. 4.14 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento della temperatura (°C).....	48
fig. 4.15 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento dei gradienti di temperatura (°C).....	49
fig. 4.16 – Assetto attuale. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 2 (°C)	50
fig. 4.17 – Assetto attuale. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 4 (°C)	51
fig. 4.18 – Assetto attuale. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 5 (°C)	52
fig. 4.19 – Assetto attuale. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 8 (°C)	53
fig. 4.20 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento della salinità (g/l)	54
fig. 4.21 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento della velocità (m/s).....	56
fig. 4.22 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 2 (m/s)	57
fig. 4.23 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 5 (m/s)	58
fig. 4.24 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 8 (m/s)	59
fig. 4.25 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento della temperatura (°C)	60
fig. 4.26 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento dei gradienti di temperatura (°C).....	61
fig. 4.27 – Assetto attuale. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 2 (°C)	62
fig. 4.28 – Assetto attuale. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 4 (°C)	63
fig. 4.29 – Assetto attuale. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 5 (°C)	64
fig. 4.30 – Assetto attuale. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 8 (°C)	65

fig. 4.31 - Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento della salinità (g/l)	66
fig. 4.32 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della velocità (m/s)	69
fig. 4.33 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Particolari del campo di moto nella zona dello scarico della Centrale e nella zona di confluenza con il fiume Timavo	70
fig. 4.34 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della elevazione rispetto al medio mare (m)	71
fig. 4.35 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della temperatura (°C)	72
fig. 4.36 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della temperatura (°C). Particolare della zona della foce	73
fig. 4.37 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento dei gradienti di temperatura (°C)	74
fig. 4.38 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della salinità (g/l)	75
fig. 4.39 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della salinità (g/l). Particolare della zona della foce	76
fig. 4.40 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento dei gradienti di salinità (g/l)	77
fig. 4.41 - Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento della velocità (m/s)	80
fig. 4.42 - Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 2 (m/s)	81
fig. 4.43 - Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 5 (m/s)	82
fig. 4.44 - Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 8 (m/s)	83
fig. 4.45 - Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento della temperatura (°C)	84
fig. 4.46 - Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento dei gradienti di temperatura (°C)	85
fig. 4.47 - Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 2 (°C)	86
fig. 4.48 - Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 4 (°C)	87
fig. 4.49 - Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 5 (°C)	88
fig. 4.50 - Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 8 (°C)	89
fig. 4.51 - Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento della salinità (g/l)	90
fig. 4.52 - Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento della velocità (m/s)	92
fig. 4.53 - Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 2 (m/s)	93
fig. 4.54 - Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 5 (m/s)	94
fig. 4.55 - Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 8 (m/s)	95
fig. 4.56 - Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento della temperatura (°C)	96
fig. 4.57 - Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento dei gradienti di temperatura (°C)	97
fig. 4.58 - Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 2 (°C)	98
fig. 4.59 - Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 4 (°C)	99
fig. 4.60 - Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 5 (°C)	100
fig. 4.61 - Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 8 (°C)	101
fig. 4.62 - Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento della salinità (g/l)	102

Indice delle tabelle

tab. 2.1 - Parametri caratteristici dell'opera di scarico nelle diverse condizioni studiate	12
tab. 3.1 - Valori dei parametri utilizzati per la simulazione delle condizioni di massimo carico estivo.....	26

STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
0	28/01/2005	A5019707	Prima emissione

Sommario – Abstract

La dispersione termica delle acque di raffreddamento della centrale di Monfalcone, di proprietà ENDESA Italia S.p.A., presenta una interazione con il territorio date le modalità di scarico, in un canale artificiale chiuso, e date le peculiari caratteristiche del bacino idrico cui tale canale è connesso.

Di conseguenza, è stato messo a punto un modello numerico tridimensionale di simulazione dell'intero bacino Lisert-Timavo mediante il quale è stato possibile caratterizzare la dispersione termica e l'assetto idrologico dell'intera area, ed analizzare le condizioni di dispersione termica con riferimento all'assetto attuale della centrale, nelle diverse condizioni di esercizio e tenendo conto delle condizioni ambientali con particolare riferimento all'effetto fondamentale della marea.

A seguito della progettata trasformazione del gruppo 4 della centrale a ciclo combinato e alla contemporanea messa fuori esercizio del gruppo 3, tale modello è stato impiegato per una valutazione dell'impatto di tale trasformazione sulla dispersione termica nel nuovo assetto.

The thermal diffusion of the cooling water of the Monfalcone Power Plant, ENDESA Italia S.p.A. proprietary, shows a interaction with the environment depending on the discharge facility, located in an artificial closed channel, and depending on the special characteristics of the hydraulic basin where this channel is connected.

Therefore, a numerical three dimensional model has been realized that simulates the whole Lisert-Timavo basin; by means of this model the characterization of the thermal diffusion and the hydraulic configuration has been performed, in the different operating conditions and taking into account the environmental characteristics with special attention to the tidal effects.

Taking into account the designed transformation of the section 4 of the plant in a combined cycle and the simultaneous stop of the section 3, this model has been used in order to evaluate the impact of this transformation on the thermal diffusion coming from the new plant configuration.

1 INTRODUZIONE

1.1 Scopo dello studio

La centrale termoelettrica di Monfalcone (Gorizia), di proprietà di ENDESA Italia è attualmente composta da quattro gruppi convenzionali, dei quali il gruppo 1 da 165 MW, il gruppo 2 da 171 MW ed i gruppi 3 e 4 da 320 MW ciascuno, per una potenza totale installata di 976 MW ed utilizza per il ciclo di raffreddamento acqua di mare prelevata dal canale Valentinis.

A seguito della progettata trasformazione a ciclo combinato del gruppo 4, con l'accoppiamento di due turbogas sulla turbina preesistente, e la contemporanea messa fuori esercizio del gruppo 3, l'assetto dell'impianto sarà modificato. In particolare, la quantità di calore complessivamente scaricata dal circuito di raffreddamento nel nuovo assetto rispetto alla configurazione attuale sarà ridotta di circa il 24%..

La riduzione del calore non è tuttavia sufficiente a garantire a priori un miglioramento delle condizioni di dispersione. Infatti le condizioni nelle quali avviene la diffusione termica delle acque di raffreddamento risultano del tutto particolari; è immediato constatare, da un esame della configurazione del territorio e tenendo conto della natura carsica dello stesso, come lo scarico delle acque di raffreddamento avvenga sì in un canale artificiale quale il Lisert, e quindi in condizioni localmente ben definite, ma risenta dell'influenza dei vari corpi idrici ad esso collegati, quali il canale Tavoloni, il canale Moschenizze ed il fiume Locavaz. Quest'ultimo, raccogliendo le acque dei corpi prima citati, confluisce nel fiume Timavo che a sua volta sbocca nel mare, e questo fa sì che l'effetto delle maree influenzi pesantemente l'intero sistema idrico, con il conseguente incunarsi di acqua salata che raggiunge anche il canale Lisert in cui avviene lo scarico. Allo scopo di poter tenere conto di tutti gli effetti sopra descritti, è stato messo a punto un modello di simulazione numerica dell'intero bacino Lisert-Timavo, impiegato con successo nella valutazione delle condizioni di dispersione termica nella attuale configurazione di impianto [1].

L'obiettivo del presente studio è pertanto quello di valutare, mediante l'uso del modello di simulazione numerica sopra citato, l'impatto della trasformazione a ciclo combinato sulla dispersione termica delle acque di raffreddamento.

1.2 Descrizione dell'attività

Lo studio prevede l'analisi della perturbazione termica conseguente allo scarico delle acque della centrale nell'assetto di esercizio a cicli combinati, allo scopo di valutare l'impatto della trasformazione dell'impianto rispetto alle condizioni attuali di esercizio.

A tale scopo, l'analisi è stata condotta in tre fasi:

1. confronto delle condizioni di scarico nelle configurazioni di impianto attuale e trasformata;
2. scelta della condizione ambientale più critica dal punto di vista della dispersione termica, a partire dai risultati ottenuti nello studio descritto in [1];
3. esecuzione della simulazione numerica nelle condizioni ambientali individuate al punto precedente e nelle condizioni di scarico future.

La simulazione numerica è stata eseguita utilizzando il modello numerico tridimensionale descritto e già utilizzato nei precedenti studi, che considera l'intero bacino del Lisert-Timavo, comprendente:

- il canale artificiale Lisert in cui avviene la restituzione di tutte le acque di raffreddamento della centrale;
- il canale Moschenizze, che raccoglie le acque del fiume Moschenizze e delle sorgenti Sardos;
- il canale Tavoloni, che raccoglie le acque delle sorgenti Lisert e Sablici;
- il canale collettore o Locavaz in cui confluiscono il canale Moschenizze, il canale Tavoloni ed il canale Lisert;
- il fiume Timavo inferiore, nel tratto compreso tra la confluenza dei tre rami sorgivi, a valle delle saracinesche dell'acquedotto ACEGAS, e la foce.

Il contenuto operativo di ciascuna delle fasi sopra citate è ampiamente descritto nei successivi paragrafi. e l'analisi dei risultati è stata condotta con particolare riferimento alla definizione del campo dinamico, di temperatura e di salinità.

1.3 Documenti di riferimento

- [1] G. Agate, R. Guandalini, R. Cironi, P. Fontana, T. Granata, L. Meloni – *Definizione della Dispersione termica e descrizione dell'assetto idrobiologico della zona interessata dallo scarico delle acque di raffreddamento della centrale di Monfalcone* – CESI A4/011950 (Aprile 2004)
- [2] Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia. Direzione Regionale della Pianificazione Territoriale. Servizio della Informazione Territoriale e della Cartografia.- *Vestizione Carta Numerica Versione 1.1.00. Quadro 109031 "Foce del Timavo" e quadro 109044 "San Giovanni del Timavo"*
- [3] CMS Associati – *Studio d'Impatto Ambientale Relativo all'Ampliamento della Cartiera del Timavo* CTS. Comune di Duino Aurisina (Trieste) – Cartiere del Timavo e del Sole SpA (marzo 1990)
- [4] ENEL Centro Progettazione e Costruzione Idraulica Venezia – *Centrale di Monfalcone. Gruppi 3-4. Opera di Scarico – Disegno n. 27.104 Scale varie* (Giugno 1980)
- [5] AA.VV. – *Caratteristiche Diffusive dell'Atmosfera. Criteri Generali del lavoro e Guida alla sua Utilizzazione.* – Servizio Meteorologico Aeronautica Militare. ENEL (1991)
- [6] M. Hopper – *WXTide32 version 2.6* – www.wxtide32.com (January 2000)

2 ANALISI DELLE CONDIZIONI INFLUENZANTI LA DISPERSIONE TERMICA

2.1 Considerazioni generali

Lo scarico da parte di centrali termoelettriche dell'acqua proveniente dai circuiti di raffreddamento mediante scarichi a cielo aperto direttamente in corpi fluviali o indirettamente tramite canali artificiali è tipicamente condizionato dalla conformazione e dalle condizioni idrauliche degli stessi del sito nonché dalle condizioni di esercizio degli impianti. Pertanto è necessario individuare, attraverso la raccolta e l'analisi dei dati caratteristici del sito e degli impianti, le condizioni di simulazione più adatte allo scopo. In generale vengono considerati:

- dati geometrici di impianto, relativi soprattutto alle opere di scarico;
- dati relativi alla configurazione dei corpi idrici e alla relativa batimetria;
- dati relativi ai valori di temperatura, portata e livello dei corpi idrici;
- dati relativi ai parametri meteorologici;
- dati di esercizio della centrale, quali potenza, modalità di esercizio e portata di scarico dei circuiti di raffreddamento;
- dati relativi alle condizioni marine, con particolare riferimento alle condizioni di marea.

L'analisi dettagliata delle condizioni ambientali caratteristiche del sito, derivanti anche da campagne sperimentali eseguite appositamente dalla centrale e da misure eseguite indipendentemente da strutture pubbliche competenti per territorio, è riportata in dettaglio nel documento [1]; nel seguito pertanto, viene riportato un breve sommario dei risultati di tale analisi, con particolare riferimento alle condizioni cui il presente studio fa riferimento.

2.2 Condizioni di esercizio

La centrale di Monfalcone è collocata nell'area industriale e portuale di Monfalcone, in provincia di Gorizia; essa preleva l'acqua di raffreddamento dal canale Valentinis, che fa parte del sistema portuale e come tale è direttamente collegato al mare, e la restituisce a nord dell'abitato nel canale artificiale Lisert, a sua volta connesso al sistema idrico comprendente il canale Tavoloni, il canale Moschenitze, il canale collettore Locavaz ed il fiume Timavo, che sfocia direttamente in mare, come illustrato in fig. 2.1 tratta da [2].

Di conseguenza, la struttura e la collocazione dell'opera di presa non riveste alcun interesse ai fini del presente studio, mentre viceversa risulta essenziale la definizione dell'opera di scarico, che risulta localizzata in testa al canale artificiale Lisert, ad una profondità compresa tra -1.5 m e -4.5 m s.l.m., e le cui viste in pianta ed in sezione sono riportate in fig. 2.2 ed in fig. 2.3 rispettivamente.

2.2.1 Assetto attuale della centrale

La centrale dispone attualmente di quattro gruppi, dei quali i primi due, da 165 e 171 MW rispettivamente, dispongono di un circuito di raffreddamento a doppio passaggio con una portata di acqua di raffreddamento

pari a 5.5 m³/s ciascuno, mentre i gruppi 3 e 4 dispongono di un circuito di raffreddamento a semplice passaggio con una portata di acqua di raffreddamento di 12.5 m³/s ciascuno.

Di conseguenza, le condizioni di esercizio alla massima potenza, cui si fa riferimento come condizione di massimo impatto nel presente studio, presuppongono lo scarico nel canale Lisert di una portata di 36 m³/s di acqua di raffreddamento, avente una salinità media di circa 35 g/l.

Il calore scaricato complessivamente che corrisponde ad un incremento termico di 8 °C rilevato in campo, nelle condizioni di riferimento, tra la presa e la restituzione, risulta di circa 285000 kcal/s. Il valore di 8 °C, conforme alla situazione reale nella quale è stata effettuata la campagna di misure, è quello utilizzato nello studio di cui al riferimento [1].

2.2.2 *Assetto futuro a cicli combinati della centrale*

La trasformazione a cicli combinati prevede la trasformazione del gruppo 4 con due turbogas accoppiati alla attuale turbina a vapore e la messa fuori servizio del gruppo 3, a seguito della quale l'assetto previsto per la centrale diventa:

- a) nuovo gruppo 4 a ciclo combinato
 - portata complessiva acqua di raffreddamento: 16.17 m³/s;
- b) gruppo 3 fermo
- c) gruppi 1 e 2 situazione invariata
 - portata complessiva gruppo 1: 5,5 m³/s
 - portata complessiva gruppo 2: 5,5 m³/s.

In definitiva, in condizioni a pieno carico, la nuova portata complessiva dell'acqua di raffreddamento sarà di 27.17 m³/s, il calore scaricato di 230.963 kcal/s, mentre il salto termico complessivo sarà di 8.5 °C.

In realtà va evidenziato che, per la situazione futura, in mancanza di dati sperimentali, si è fatto ricorso a bilanci termici di progetto (sia per il contributo del nuovo gruppo che per i gruppi 1 e 2 attuali). Ciò comporta una sovrastima della potenza termica scaricata e del relativo sovrariscaldamento rispetto alla reale condizione di esercizio, ma, risultando questa condizione conservativa ai fini dello studio in oggetto, i dati sopra indicati sono stati assunti come input al modello.

In definitiva, la quantità di calore complessivamente scaricato nell'assetto futuro risulta ridotta del 20% se si confrontano i dati reali della situazione attuale con quelli di progetto della situazione futura, mentre la riduzione risulta del 24% se si confrontano, per entrambe le situazioni, i dati di progetto.

2.2.3 *Condizioni relative al prelievo delle acque di raffreddamento*

Per quanto riguarda gli aspetti legati al prelievo delle acque di raffreddamento dei condensatori, occorre tenere presente che esso è realizzato per tutti i gruppi mediante un'apposita opera di presa dal canale Valentinis, che si trova nella zona portuale in diretto collegamento con il mare.

Di conseguenza, l'acqua di raffreddamento presenta le medesime caratteristiche dell'acqua di mare. In particolare, essendo il canale Valentinis in collegamento con la baia di Panzano, le caratteristiche di temperatura e salinità risultano assai simili. Per quanto riguarda la temperatura, essa risulta variare tra i 7 °C

del periodo invernale (gennaio-febbraio) ed i 26 °C del periodo estivo (luglio – agosto), con punte che possono anche superare i 27 °C in anni particolarmente caldi. Sempre nel periodo estivo è presente nella baia una sensibile stratificazione di temperatura, con un valore medio di profondità intorno ai 15-17 °C, ma data la struttura dell'opera di presa si può ritenere che la temperatura in ingresso ai circuiti di raffreddamento corrisponda alla temperatura marina superficiale.

Infine una particolare importanza riveste il valore di salinità dell'acqua prelevata, in quanto essa verrà poi scaricata nel canale Lisert che è collegato a corpi fluviali alimentati alla sorgente da acqua dolce, anche se influenzati dall'acqua fredda salata proveniente dal mare durante le fasi di marea crescente. Dalle misure condotte e da dati di letteratura, si vede come tale valore varia tra 37.7 e 38.1 g/l, per cui nelle simulazioni qui condotte è stato assunto un valore medio di 38.0 g/l.

2.2.4 Condizioni relative allo scarico delle acque di raffreddamento

Le condizioni di scarico dipendono sia dalle condizioni di esercizio, già analizzate in precedenza, sia dalle condizioni dell'acqua prelevata all'opera di presa, anch'esse già descritte.

Per quanto riguarda gli aspetti legati allo scarico delle acque di raffreddamento dei condensatori, va tenuto presente che la qualità dal punto di vista chimico e fisico delle acque di raffreddamento reimmesse nel canale Lisert è costantemente controllata nel corso dell'esercizio: da tali dati risulta che l'utilizzo in centrale non dà luogo a variazioni delle caratteristiche qualitative delle acque prelevate, sia dal punto di vista qualitativo che rispetto alle norme presenti nel D.L. 152/99 e successive modifiche.

Poiché la trasformazione considerata non altera le condizioni chimiche e fisica dell'acqua di mare utilizzata per il raffreddamento, l'impatto ambientale dovuto allo scarico delle acque di raffreddamento è quindi essenzialmente di tipo termico, ed è appunto questo aspetto che viene considerato nel presente studio.

L'opera di scarico restituisce le acque di raffreddamento all'inizio del canale artificiale Lisert, mediante un'opera apposita. Lo scarico è di tipo sommerso, collocato tra le quote di -1.5 m e -4.5 m s.l.m., in prossimità della sponda sinistra del canale stesso, provvisto di due setti di convogliamento e con una ampiezza di 22.97 m, come indicato nella vista in pianta di fig. 2.2 e nella vista in sezione di fig. 2.3, tratte da [4]. Di conseguenza, la sezione efficace di scarico risulta pari a 68.91 m².

Tenendo conto di quanto sopra esposto, le caratteristiche di scarico nell'assetto attuale e trasformato, con riferimento alle condizioni di pieno carico, sono quelle riassunte nella tab. 2.1.

2.2.5 Considerazioni relative al contributo dello scarico della Cartiera del Timavo

Le condizioni di scarico della centrale sono ovviamente determinanti per la simulazione dei fenomeni legati alla diffusione termica nel bacino Lisert-Timavo, ma tuttavia occorre anche considerare la presenza della Cartiera del Timavo, di proprietà della società Burgo, che preleva acqua, sia per il raffreddamento della propria centrale termica che per il processo produttivo, dal fiume Timavo e la scarica direttamente nel canale collettore Locavaz a valle della confluenza in esso del canale artificiale Lisert.

Dai dati reperiti e principalmente riassunti in [3], sono state dedotte le condizioni tipiche di scarico dell'impianto stesso. Come si vede dalla fig. 2.4, la portata complessivamente assorbita e restituita al canale Locavaz è stimata in 3625 m³/h (1 m³/s), ed è restituita attraverso una condotta di scarico di circa 2 m di diametro, a pelo dell'acqua.

Per quanto riguarda le condizioni di temperatura e salinità allo scarico, poiché il prelievo avviene nel Timavo immediatamente a monte della confluenza del Locavaz, si sono assunte le condizioni medie di salinità e temperatura di questo tratto di fiume che presenta, essendo influenzato fortemente dalle maree, valori di salinità pari a circa 30 g/l e di temperatura pari a 25 °C in condizioni estive e di 30 g/l e 11.9 °C in condizioni invernali, con un incremento termico medio di 3.3 ° C, calcolato assumendo che la centrale termica a ciclo combinato della cartiera Burgo restituisca circa 1/6 del calore prodotto e sapendo che la portata di raffreddamento è di 1425 m³/h.

<i>Dimensione caratteristica</i>	<i>Assetto attuale</i>	<i>Assetto a CC</i>	<i>Unità</i>
Larghezza	22.97		m
Quota max superiore	-1.5		m
Quota inferiore	-4.5		m
Sezione totale efficace	68.9		m ²
Portata totale	36	27.17	m ³ /s
Sovralzo termico medio	8	8.5	°C
Velocità di scarico	0.5225	0.39434	m/s

tab. 2.1 - Parametri caratteristici dell'opera di scarico nelle diverse condizioni studiate

2.3 Caratteristiche ambientali e del territorio

Dal punto di vista della valutazione dei parametri ambientali e territoriali, il modello di simulazione utilizzato prende in considerazione i seguenti aspetti:

- morfologia e condizioni dei corpi idrici interessati sia dallo scarico che dai fenomeni mareali
- caratteristiche del flusso idrico per i diversi contributi portati al sistema
- caratteristiche dell'alveo dei diversi corpi idrici
- condizioni marine influenzanti il sistema, con particolare riferimento alle condizioni di marea
- condizioni meteorologiche.

Più precisamente il modello di simulazione numerica impiegato richiede la conoscenza della planimetria e del profilo idraulico dei corpi idrici lungo tutto il tratto considerato, delle condizioni di temperatura e salinità delle diverse componenti idriche che alimentano il sistema nonché la conoscenza dei valori di portata e livello corrispondenti allo scenario simulato. L'analisi dettagliata del territorio, delle condizioni climatiche ed ambientali, a partire dalle diverse fonti documentali e sperimentali, è ampiamente illustrata in [1]; qui di seguito verranno richiamati i valori caratteristici dei parametri ambientali risultanti da tale analisi.

2.3.1 *Dati relativi alla morfologia dell'alveo ed alla batimetria*

L'insieme dei dati inerenti alla morfologia dell'alveo dei diversi corpi idrici riveste una importanza fondamentale, in quanto da essa discende la discretizzazione spaziale utilizzata dal modello per le simulazioni numeriche e la posizione esatta dell'impianto nel dominio di calcolo. In particolare, con riferimento alla carta di fig. 2.1, viene considerato l'intero corpo dei canali Lisert e Locavaz, l'intero corso del Timavo a valle delle opere di presa dell'acquedotto, fino alla foce, ed un tratto dei canali Moschenizze e Tavoloni a monte della confluenza con il Lisert di alcune centinaia di metri, in modo da poter considerare completamente sviluppato il campo di moto in presenza dell'influenza di marea e quindi di poter analizzare il comportamento del pennacchio termico in maniera corretta. Sempre con riferimento alla carta di fig. 2.1, il tratto di dominio considerato si sviluppa per circa 6 km in totale, e comprende anche le zone di secca presenti in prossimità della foce e le zone di morta nel tratto finale del fiume Timavo, in corrispondenza della sponda destra.

Per caratterizzare poi il modello numerico dal punto di vista dell'effetto della natura del fondale, occorre caratterizzare l'alveo in riferimento alla tipologia di fondo in quanto influente sul campo di moto che si instaura nel corpo idrico. Dal documento [3] si può dedurre che tutti i fondali presentano una sostanziale omogeneità, avendo una tipologia di tipo limoso-fangoso. In effetti, il materiale di dilavamento del Carso è sostanzialmente formato da limo calcareo, che tende appunto a depositarsi sul fondale dei corpi idrici affluenti. Il modello utilizza per tenere conto della natura del fondale il coefficiente di Gauckler-Strickler, che indica il grado di scabrezza dell'alveo: esso è stato assunto pari a $42 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$.

2.3.2 *Dati relativi al flusso idrico*

I dati relativi al flusso idrico hanno lo scopo di fornire tutte le informazioni atte a definire il comportamento nel tempo dei corpi idrici nel tratto di competenza dell'impianto; da questi infatti sono ricavate principalmente le informazioni relative all'andamento del livello medio, della portata, della temperatura naturale e della salinità naturale per i diversi periodi dell'anno.

Il modello numerico di simulazione richiede l'imposizione di condizioni al contorno sulle sezioni aperte del dominio di calcolo, sia per quanto riguarda il valore della portata che le condizioni di temperatura e salinità dell'acqua. In particolare, data la struttura del dominio considerato è conveniente dal punto di vista modellistico fissare questi parametri per i corpi idrici affluenti (canale Tavoloni, canale Moschenizze e fiume Timavo) e fissare alla sezione di foce i valori di livello e di salinità coerenti con le condizioni di marea. In questo modo il moto dell'acqua può svilupparsi liberamente lungo i vari tratti idraulici considerati e le condizioni idrodinamiche simulate dal codice si assestano naturalmente.

Per quanto riguarda i valori di portata, vengono considerati separatamente i tre sistemi idrici carsici che si scaricano a mare nel bacino considerato, e precisamente il sistema Sablici-Tavoloni, quello Moschenizze-Sardos ed infine quello del Timavo, di gran lunga il più importante. Come risulta dall'analisi di dettaglio condotta in [1], la stima della portata per il canale Tavoloni, che raccoglie le acque delle sorgenti Lisert e Sablici, è di $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ mentre per il canale Moschenizze, che raccoglie le acque delle sorgenti Moschenizze e Sardos, si considera una portata di $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Data la natura carsica delle sorgenti menzionate, tali valori si possono ragionevolmente considerare costanti nei diversi periodi dell'anno, con rare fluttuazioni dovute a periodi di scarsa piovosità o di piena.

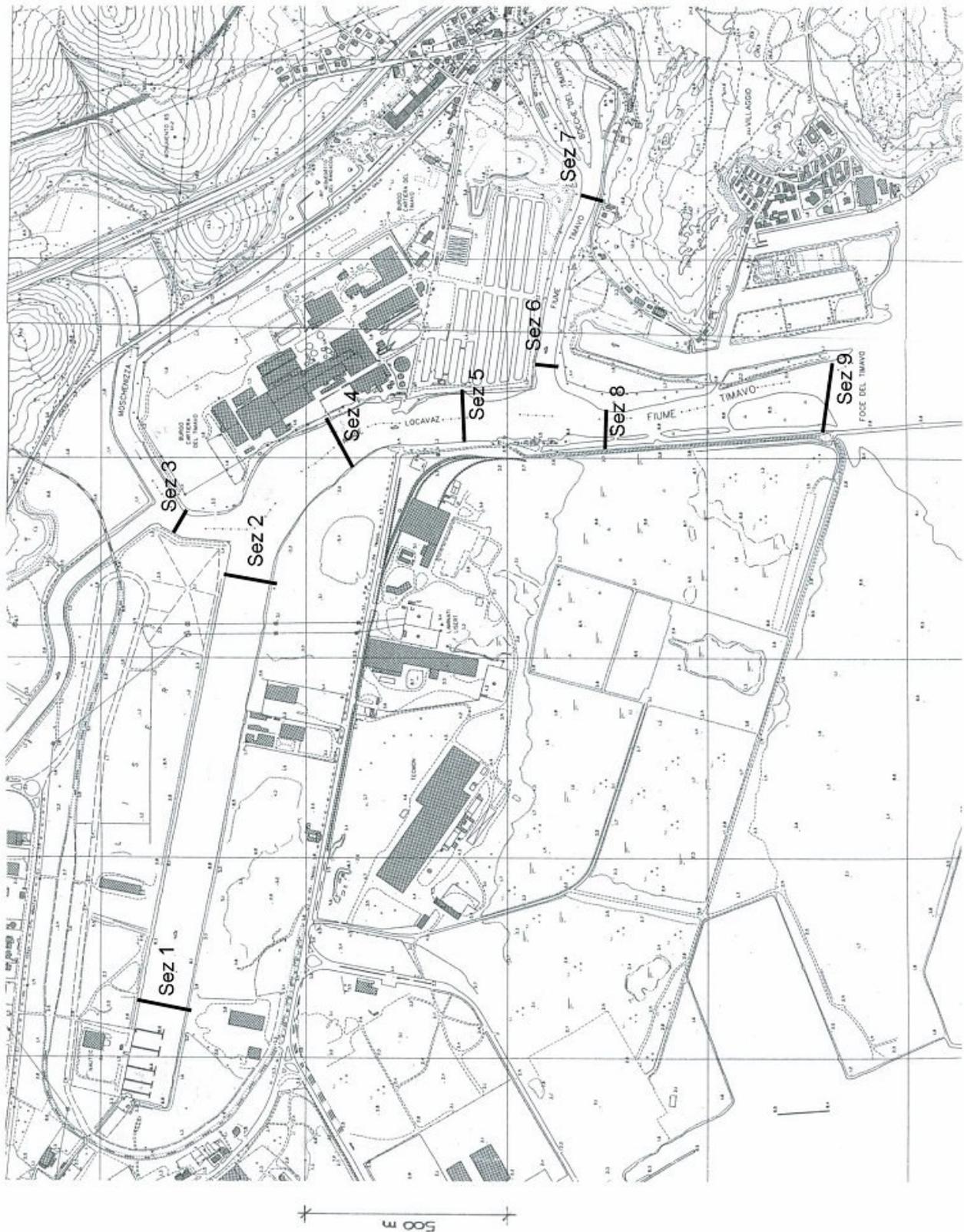
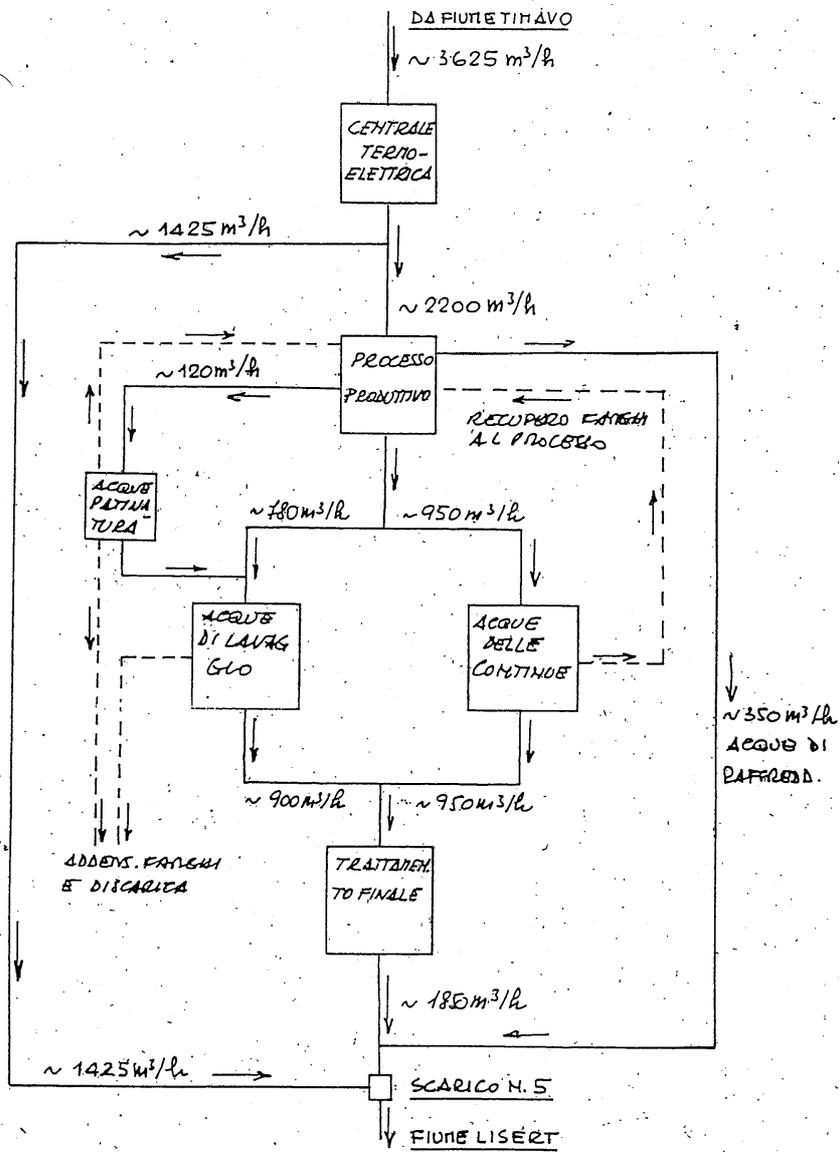


fig. 2.1- Area del bacino Lisert-Timavo interessata dallo scarico della Centrale di Monfalcone, con l'indicazione delle sezioni considerate nello studio

C.T.S.TIMAVO

FIG.1 CICLO ACQUE DI CARTIERA
ATTUALE



282

7-2-90 *Ch*

fig. 2.4 - Ciclo delle acque di raffreddamento e di processo impiegate nella cartiera del Timavo

Più problematica risulta la definizione della portata del Timavo, che costituisce comunque il sistema più importante nel bacino studiato, a causa del suo percorso in parte sotterraneo. Tuttavia è stato possibile, come documentato in [1], determinare l'andamento delle portate anche per questo fiume, nel tratto di interesse, utilizzando una serie di dati sperimentali, da cui è risultato che:

- a) la portata media annua è di circa $30.2 \text{ m}^3/\text{s}$;
- b) la portata massima mensile si verifica in genere nel periodo invernale e si attesta nell'intorno di $45 \text{ m}^3/\text{s}$;
- c) la portata minima mensile si verifica in genere nel periodo estivo e si attesta intorno a $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.3.3 Dati relativi alle condizioni di temperatura e salinità dei diversi corpi idrici

Le condizioni dell'acqua entrante nel dominio sono caratterizzate dai valori di temperatura e salinità.

Per quanto riguarda la temperatura, essa dipende soprattutto dalla origine carsica delle acque stesse piuttosto che dalle influenze stagionali, con una sensibile influenza della marea e quindi della temperatura dell'acqua salata entrante nel sistema per effetto di essa. Riassumendo quanto emerso dall'analisi di dettaglio contenuta in [1], risulta che:

- a) la temperatura alle sorgenti del fiume Timavo presenta un andamento di tipo sinusoidale, con un minimo nel mese di febbraio ed un massimo ai primi di agosto. Tale valore minimo è in media pari a $11.0 \text{ }^\circ\text{C}$, mentre il valore massimo è in media pari a $12.8 \text{ }^\circ\text{C}$, occasionalmente spinto fino a $13 \text{ }^\circ\text{C}$, da cui consegue che la temperatura è in media pari a $11.9 \text{ }^\circ\text{C}$. Da questa considerazione emerge il fatto che la temperatura alla sorgente è pochissimo variabile con le stagioni;
- b) per quanto riguarda i sistemi Lisert-Sablici e Moschenizze-Sardos, vale in linea generale quanto già detto per il Timavo, con valori medi e massimi in generale superiori di $0.5\div 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ rispetto a quelli del Timavo, ma con valori minimi per il Lisert-Sablici di circa un grado inferiori nel periodo invernale per l'influenza delle acque più fredde del bacino dell'Isonzo, che in parte alimentano per filtrazione tali sorgenti;
- c) per quanto riguarda la temperatura dell'acqua di mare che viene prelevata dalla centrale dal canale Valentinis e quindi dell'acqua di raffreddamento scaricata nel canale artificiale Lisert, in diretto collegamento col mare, si possono distinguere tipicamente un periodo invernale e primaverile, che va da ottobre ad aprile compresi, in cui la temperatura dell'acqua è pressoché costante tra superficie e fondale, con un minimo in febbraio attorno ai $7 \text{ }^\circ\text{C}$, ed un periodo estivo ed autunnale, che va da maggio a settembre, in cui è invece presente una sensibile stratificazione termica. In questo caso, infatti, si forma sulla superficie uno strato caldo che raggiunge in media i $26 \text{ }^\circ\text{C}$, ma con un decremento rapido della temperatura con la profondità, fino a valori di $15 \text{ }^\circ\text{C}$ al fondo della baia di Panzano. Tuttavia non è noto direttamente l'andamento che in questo caso si realizza nel canale Valentinis in prossimità dell'opera di presa, per cui la valutazione della temperatura dell'acqua di raffreddamento è stata fatta sulla base delle misure effettuate all'ingresso dei gruppi, fornite direttamente dalla centrale per il periodo settembre 2002 – agosto 2003, e riportate in fig. 2.5; tali valori confermano un minimo di poco superiore ai $7 \text{ }^\circ\text{C}$ in inverno (febbraio) ed un massimo di $25 \text{ }^\circ\text{C}$ in estate, per il periodo considerato, e questi valori sono stati considerati nello studio come valori limite caratterizzanti la temperatura in ingresso dell'acqua di raffreddamento.

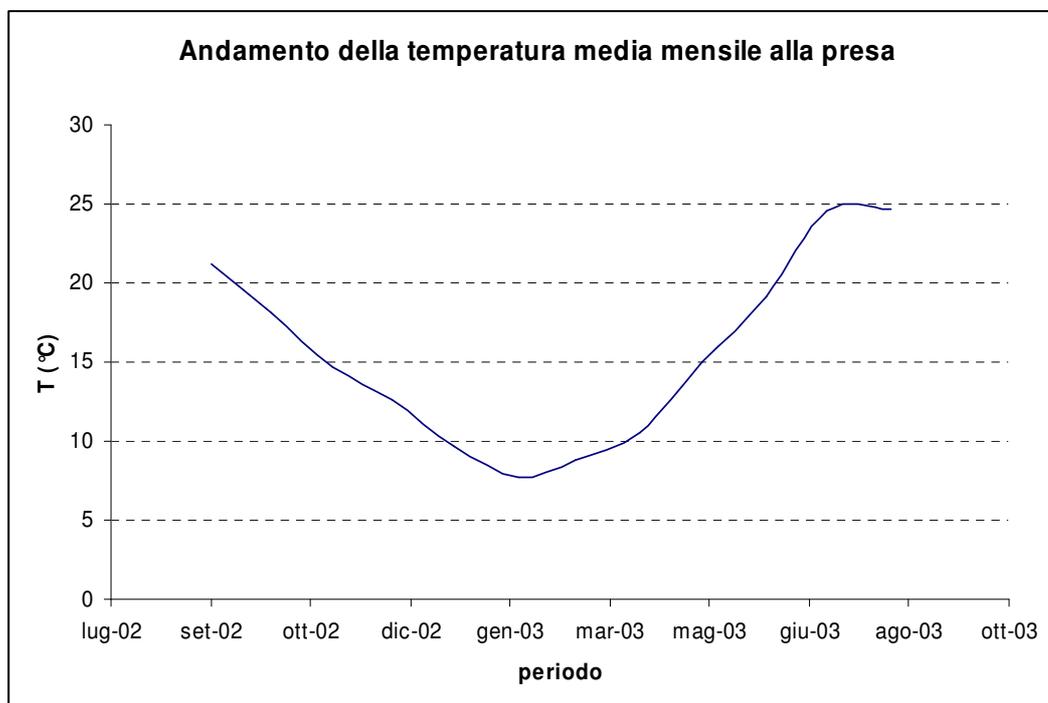


fig. 2.5 - Andamento della temperatura media all'opera di presa della centrale Endesa

Per quanto riguarda la salinità dell'acqua di mare entrante nel sistema sia per effetto della marea che dello scarico della centrale nel canale Lisert, ai fini dello studio è stato assunto un valore medio di 38 g/l risultante dalle misure sperimentali disponibili [1].

2.3.4 Dati relativi alle condizioni meteorologiche

I dati meteorologici, presi in considerazione e ritenuti validi per la tipologia di sito in studio fanno riferimento alla direzione e velocità del vento, per la sua correlazione con lo scambio termico con l'atmosfera e lo sforzo superficiale, nelle varie stagioni e condizioni climatiche.

Tali dati sono stati ricavati dalla banca dati realizzata congiuntamente da Enel e dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare (SMAM) [5]; in essa sono raccolti i dati di 185 stazioni meteorologiche dell'Aeronautica e di alcune stazioni poste presso centrali Enel. Tale banca è in grado di fornire opportune medie sulle grandezze di maggior interesse meteorologico, per ciascuna delle stazioni contenute, per un arco di tempo che va dal 1957 al 1997.

Valutando la dislocazione delle varie stazioni di misura nella regione Friuli-Venezia Giulia, la stazione più prossima all'area di Monfalcone risulta essere la stazione di Ronchi dei Legionari (Lat. 45°49', Long. 13°29', Alt. 12 m s.l.m.), a circa 9 km. I dati ottenuti sono riportati in fig. 2.6, da cui risulta che le condizioni di calma di vento, con velocità cioè inferiori o pari a 2 m/s, sono assolutamente prevalenti, corrispondendo ad una frequenza annuale del 72.1 %, di cui il 53.7 % di calma assoluta di vento (< 0.5 m/s). Se poi si tiene

conto che velocità inferiori a 3.5 m/s sono l' 85.8 % del totale, si vede bene come non siano frequenti effetti di vento particolarmente spinti, con assoluta prevalenza dei venti da ENE, di intensità varia ma comunque in genere non superiore agli 8 nodi.

Le condizioni sopra esposte portano a concludere che gli effetti di sforzo superficiale dovuti al vento, che richiederebbero la presenza di un vento continuo di intensità sufficientemente elevata per un periodo di tempo significativo, possono essere trascurati; le tipiche raffiche di bora, che possono raggiungere anche valori assai elevati (> 24 nodi), e che esercitano una forte influenza sulla superficie dei corsi d'acqua, dato anche il loro orientamento, hanno una frequenza dell'ordine del 2.3 % e non saranno considerate nello studio. Pertanto, l'unico effetto determinato dal vento è legato allo scambio termico con l'atmosfera, che a sua volta dipende anche dalla temperatura sia dell'aria che della superficie dell'acqua. A questo proposito, però, va ricordato che il modello numerico valuta non tanto lo scambio termico in assoluto, quanto il "raffreddamento" differenziale subito dal pennacchio caldo rispetto al corpo idrico imperturbato, che quindi dipende dalla differenza di temperatura tra pennacchio e fiume imperturbato e tra fiume imperturbato ed aria. Poiché siamo in presenza, per quanto attiene il bacino del Lisert-Timavo, di uno strato superficiale freddo e poiché il vento prevalente non supera in media i 3.5 m/s, si può assumere per il coefficiente di scambio termico con l'atmosfera il valore di $10 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.3.5 Dati relativi all'andamento della marea

Per la valutazione del livello di marea a Monfalcone, o meglio alla foce del Timavo ($45^\circ 47' \text{ N } 13^\circ 35' \text{ W}$) è stata utilizzata la procedura ampiamente descritta in dettaglio in [1]. In particolare, essa si basa sulla determinazione del valore di livello di marea istante per istante a partire da una serie armonica inserita nel modello e ricavata dalle osservazioni fornite dal modello di marea WXTide32[6] per la stazione marittima di Trieste ($45^\circ 39' \text{ N } 13^\circ 45' \text{ W}$), di cui in fig. 2.7 è riportato un esempio. La validità di tale approccio è confermata dal confronto tra i valori ricostruiti dal modello e quelli misurati nella campagna sperimentale del 23 e 24 luglio 2003, illustrato in fig. 2.8, in cui si nota come l'andamento sia ben riprodotto, con i valori minimo e massimo, che sono quelli che interessano ai fini dell'analisi modellistica, riprodotti correttamente; si evidenzia un leggero anticipo di fase, di circa 30 minuti, dovuto alla differenza di longitudine della foce del Timavo rispetto alla stazione di Trieste che ha fornito i dati del modello. In ogni caso, il modello di marea incluso nel codice di simulazione consente di introdurre la correzione di fase.

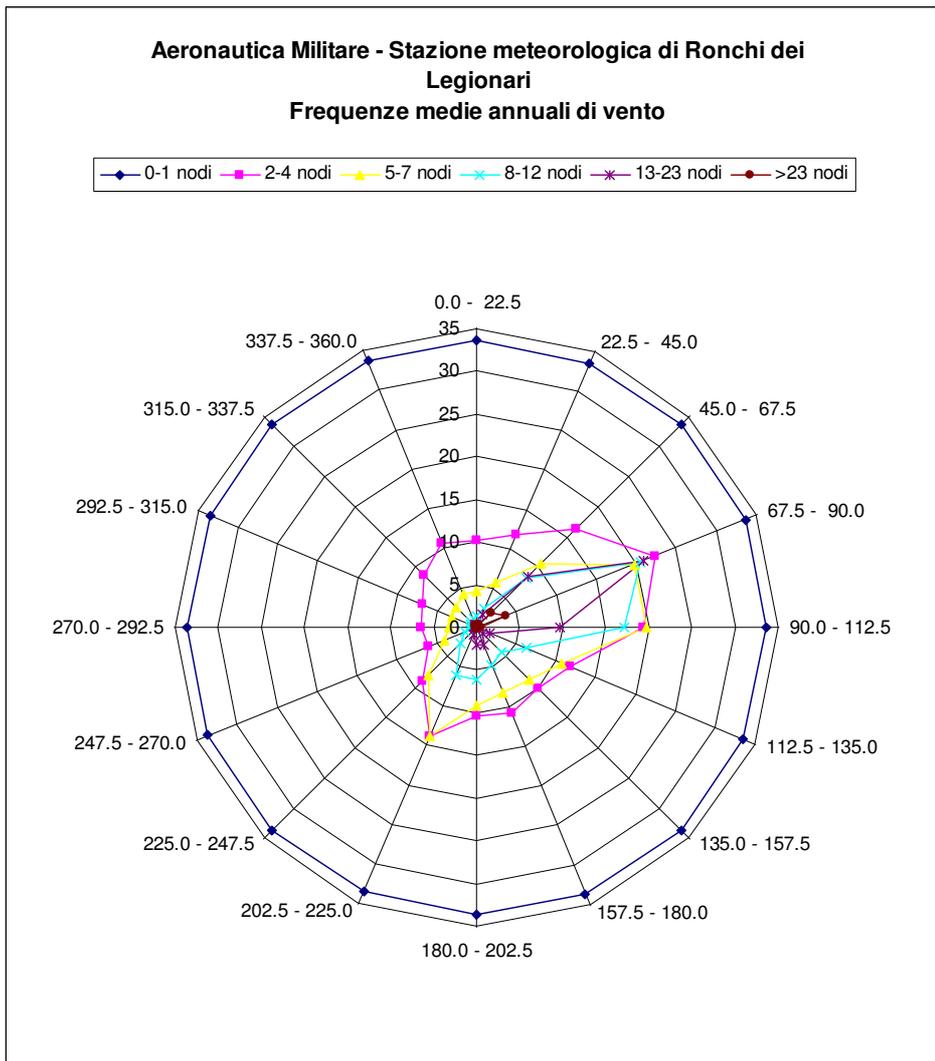


fig. 2.6 – Stazione anemonetrica di Ronchi dei Legionari. Frequenze medie annuali di vento (periodo 1967-1997)

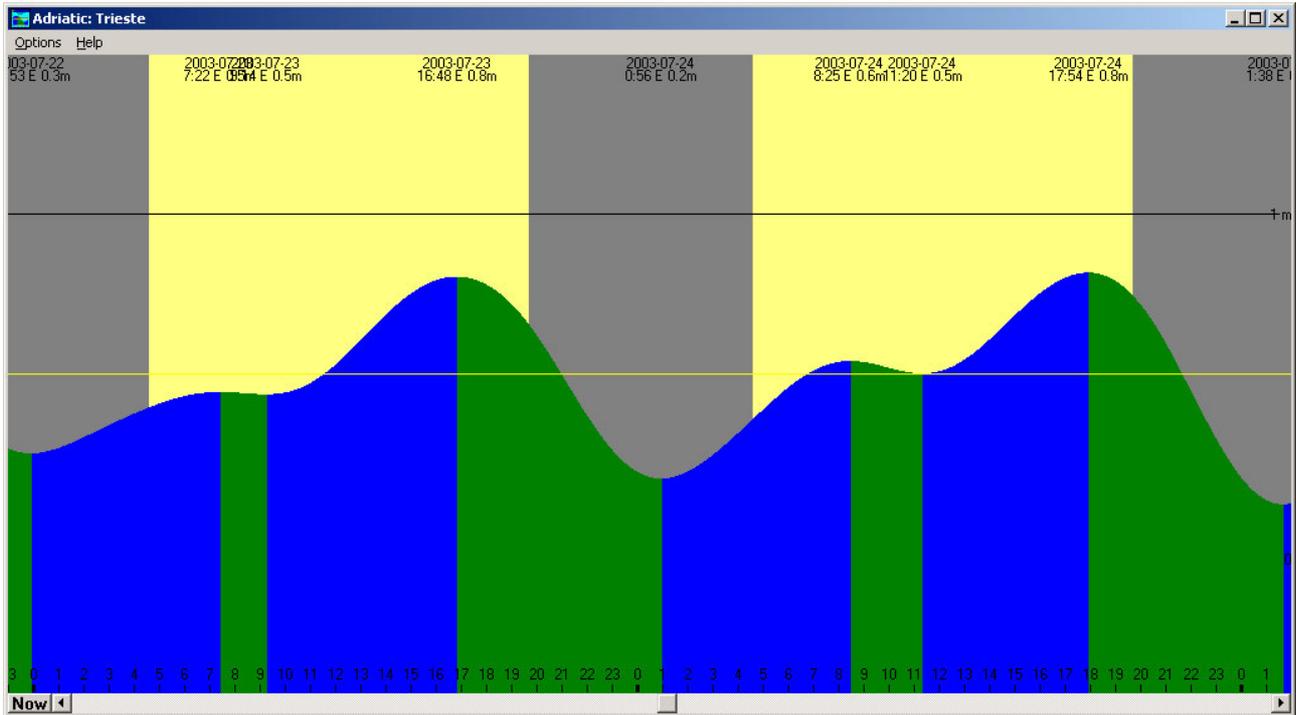


fig. 2.7 – WXTide32. Andamento mareale a Trieste del 23/24 luglio 2003

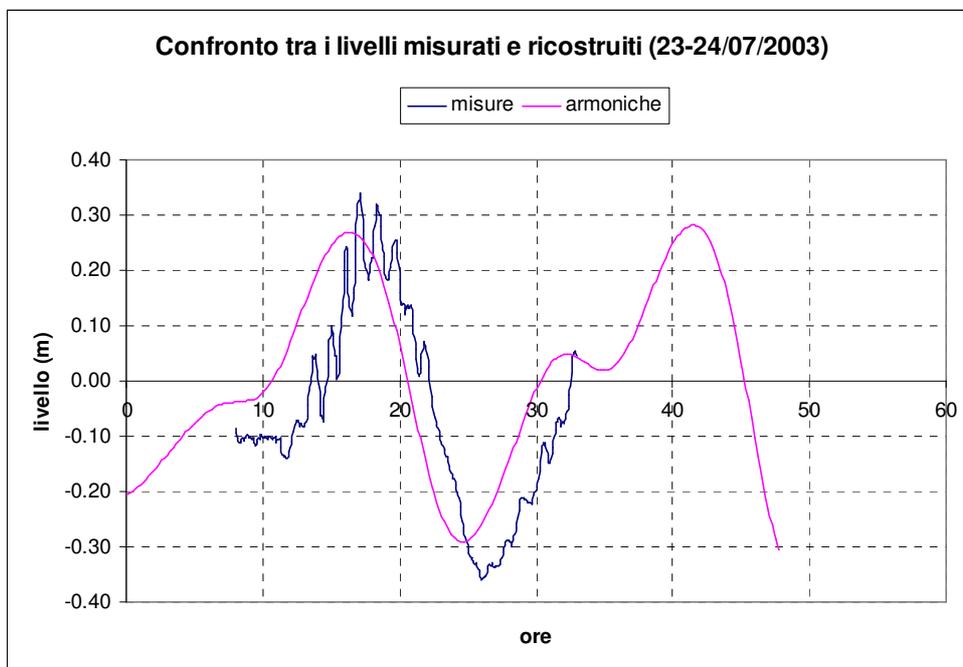


fig. 2.8 - Livello di marea ricostruito dalle componenti armoniche

3 DEFINIZIONE DELLA SCHEMATIZZAZIONE NUMERICA

3.1 Considerazioni generali

Per la simulazione numerica è stato utilizzato il modello matematico tridimensionale ampiamente descritto in [1] e basato sulle equazioni di Navier-Stokes con approssimazione idrostatica implementate nel codice HYDRA. Le caratteristiche relative alla schematizzazione numerica adottata comprendono essenzialmente:

- a) reticolo spaziale pienamente tridimensionale, ad elementi finiti esaedrici lineari;
- b) calcolo in ogni punto del reticolo dei valori di velocità nelle tre direzioni, di pressione, di densità, di temperatura e di salinità
- c) considerazione dell'effetto della turbolenza e del vento;
- d) calcolo dell'elevazione della superficie libera a partire dalle condizioni assegnate ai contorno;
- e) simulazione temporale stazionaria e non stazionaria, in grado quindi di seguire gli andamenti di marea.

La simulazione viene condotta tenendo conto dei fattori ambientali che possono influenzare la dispersione termica, quali ad esempio lo scambio termico con l'atmosfera o l'effetto dovuto alla tipologia del fondale. I risultati ottenuti nelle diverse simulazioni numeriche sono poi esaminati attraverso l'interfaccia grafico associato ed evidenziati allo scopo di determinare l'andamento del campo di velocità e del campo termico nell'intero dominio di calcolo.

Scopo principale della simulazione è la valutazione dell'impatto della trasformazione a ciclo combinato sulla dispersione termica nell'intero sistema idrico interessato, rispetto alle condizioni attualmente in essere per l'assetto corrente dell'impianto; di conseguenza, la discretizzazione spaziale e temporale è la stessa per le due configurazioni di impianto, attuale e futura, non essendo state introdotte modifiche nelle strutture di scarico ma solo nelle condizioni di esercizio.

3.2 Definizione delle condizioni di analisi

Le condizioni analizzate mediante il modello numerico sopra citato sono state scelte in base ai risultati già ottenuti nello studio della dispersione termica e descrizione dell'assetto idrobiologico della zona interessata dallo scarico delle acque di raffreddamento della centrale di Monfalcone, documentato in [1], e che fa riferimento all'assetto attuale dell'impianto.

In particolare, sempre in riferimento alla condizione di esercizio a pieno carico, le condizioni ambientali risultate le più gravose dal punto di vista della dispersione termica sono quelle relative al periodo estivo, in quanto l'apporto di acqua fredda al sistema è in termini di portata media e di temperatura non particolarmente sensibile alle condizioni stagionali, salvo la portata del Timavo, che però è minore in estate e quindi il raffreddamento per miscelamento del pennacchio termico è ridotto. In aggiunta a ciò, la temperatura del mare varia sensibilmente tra il periodo estivo e quello invernale, e poiché è presente nel periodo estivo una stratificazione di temperatura con acqua di mare in tutto il sistema idrico, con uno strato inferiore assai più freddo, si ha un effetto negativo sul galleggiamento del pennacchio, che viene trasportato più lontano.

Sulla base delle valutazioni elaborate nel precedente capitolo sulle condizioni di esercizio ed ambientali influenzanti la dispersione termica sono perciò stati definiti i valori dei parametri utilizzati nelle condizioni di analisi per le diverse sezioni aperte, nelle condizioni tipiche estive ed a pieno carico:

- a) la sezione di scarico della centrale, posta all'inizio del canale Lisert, presenta una portata pari a $36 \text{ m}^3/\text{s}$, una temperatura media allo scarico di $33.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ed una salinità di 35 g/l nelle condizioni corrispondenti all'assetto attuale di esercizio, ed una portata pari a $27.17 \text{ m}^3/\text{s}$, una temperatura media allo scarico di $33.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ed una salinità di 35 g/l nell'assetto a cicli combinati. Il valore della temperatura di ingresso alla presa, da cui si desume il sovrizzo termico allo scarico, è sempre pari a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ in media all'ingresso dei condensatori. Tale valore, inferiore alla temperatura misurata per l'acqua del mare nella baia di Panzano, come pure è inferiore il valore di salinità all'ingresso, è dovuto al fatto che nel canale Valentinis arriva acqua dolce e fredda proveniente dal Canale dei Dottori, a sua volta collegato al bacino dell'Isonzo, che presenta notoriamente valori di temperature delle sue acque assai bassi;
- b) la sezione di scarico della Cartiera del Timavo, posta circa 100 m a monte della confluenza del Timavo nel Locavaz (canale Collettore), con una portata di circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ed una temperatura di $28.3 \text{ }^\circ\text{C}$
- c) la sezione di ingresso al canale Tavoloni (ex fiume Lisert) per il tratto qui considerato, con una portata di $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ed una temperatura di $17.3 \text{ }^\circ\text{C}$
- d) la sezione di ingresso al canale Moschenizze per il tratto considerato, con una portata di $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ed una temperatura di $17.3 \text{ }^\circ\text{C}$
- e) la sezione di ingresso del fiume Timavo, collocata immediatamente a valle della confluenza delle risorgive, con una portata di $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ed una temperatura di $13.7 \text{ }^\circ\text{C}$
- f) la sezione di sbocco a mare (zona della foce) sulla quale viene imposto il livello di marea in funzione del tempo, secondo quanto descritto al paragrafo 2.3.5,

I dati sopra esposti sono riassunti in tab. 3.1.

3.3 Definizione del reticolo di calcolo e delle condizioni iniziali

La definizione del reticolo di calcolo spaziale è realizzata dal modello attraverso il modulo BATMAN (Bathymetry Manager) per la ricostruzione della batimetria dell'intero fondale a partire dalle informazioni sulle sezioni e sul profilo di ciascun corpo idrico.

Più precisamente, poiché il codice HYDRA utilizza un modello di simulazione ad elementi finiti esaedrici, viene definita una superficie di fondo del dominio di calcolo a partire ancora dai contorni del dominio e dalle sezioni assegnate, che, unitamente alla superficie libera, definisce il volume di calcolo. Tale volume viene poi, sempre dal medesimo modulo BATMAN, suddiviso in elementi esaedrici lineari rispettando una definizione di livelli (o strati) nella direzione verticale assegnati dall'utente in modo da garantire il dettaglio della simulazione anche nella direzione verticale ed il rispetto delle quote relative alle opere di scarico e/o di presa. Il dettaglio di tale suddivisione verticale consente anche la caratterizzazione della stratificazione: più fine è quello, più accurata risulterà la definizione di quest'ultima da parte del calcolo stesso.

Nella fattispecie, il reticolo risultante è illustrato in fig. 3.1. Sono stati considerati in particolare 20 strati verticali, per una profondità massima di 8.89 m, di spessore variabile; ciò consente di seguire i fenomeni con un sufficiente dettaglio con un numero totale di elementi già considerevole ma comunque gestibile. In particolare, sono presenti nel reticolo illustrato 65222 elementi per un totale di 82588 nodi di calcolo. Nelle figure dalla fig. 3.2 alla fig. 3.5 sono illustrati alcuni particolari del reticolo stesso.

Infine occorre definire le condizioni iniziali e le condizioni al contorno da adottare nelle simulazioni numeriche. Per quanto riguarda le condizioni iniziali, che cioè definiscono la situazione imperturbata rispetto alla quale viene effettuata la simulazione, sono stati adottati i seguenti criteri:

- a) velocità dell'acqua in tutto il dominio posta inizialmente uguale a 0.0 m/s. Ciò in pratica significa che si suppone inizialmente il corpo idrico fermo, e la sua distribuzione di velocità viene calcolata come stato stazionario raggiunto al termine del transitorio causato dalla imposizione delle condizioni di portata e livello nelle sezioni aperte e nelle sezioni di scarico;
- b) temperatura dell'acqua in tutto il dominio pari al valore medio imperturbato dell'acqua di mare in condizioni estive. Anche in questo caso, il campo di temperatura sarà determinato dal calcolo della situazione di equilibrio dovuta alle condizioni al contorno, in particolare dovute all'affluenza delle acque dai canali Moschenizze e Tavoloni e dal Timavo, più fredde dell'acqua di mare in condizioni estive;
- c) salinità dell'acqua in tutto il dominio pari al valore medio imperturbato dell'acqua di mare in condizioni estive. Anche in questo caso, il campo di salinità sarà determinato dal calcolo della situazione di equilibrio dovuta alle condizioni al contorno, in particolare dovute all'affluenza delle acque dolci dai canali Moschenizze e Tavoloni e dal Timavo;
- d) condizioni di marea applicate alla sezione di foce in collegamento con il mare aperto, a partire dalla condizione stazionaria di equilibrio raggiunta imponendo inizialmente il livello di medio mare.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, esse sono imposte in modo da garantire la convergenza numerica del calcolo ed il rispetto delle condizioni fisiche del problema, e sono già state riassunte nella precedente tab. 3.1.

Ulteriori condizioni valide per l'intero dominio sono:

- a) considerazione di un coefficiente di scambio termico con l'atmosfera pari a 10 W/m²°C, che corrisponde ad una situazione di temperatura media dell'acqua inferiore ai 20 °C ed una condizione media di calma di vento. Tale condizione è stata assunta valida anche in condizioni estive in quanto le misure e la letteratura evidenziano la presenza pressoché costante di uno strato superficiale freddo anche nel periodo estivo;
- b) considerazione di un coefficiente di attrito sul fondo secondo Strickler pari a 42, corrispondente al fondo naturale di un fiume o di un canale artificiale con presenza di limo e di fango

Temperatura naturale acqua di mare ⁽¹⁾	26.4	°C	
Salinità naturale acqua di mare ⁽²⁾	37.8	g/l	
Densità naturale acqua di mare	1025.6192	Kg/mc	
Calore specifico acqua di mare	4045.9965	J/Kg °C	
	attuale	futura	
Portata Scarico Centrale	36	27.17	m ³ /s
Temperatura Presa Centrale	25	25	°C
Temperatura Scarico Centrale	33	33.5	°C
Salinità Scarico Centrale	35	35	g/l
Densità Scarico Centrale	1020.676	1020.676	Kg/mc
Calore specifico Scarico Centrale	4064.65	4063.97	J/Kg °C
Portata Scarico Cartiera	1		m ³ /s
Temperatura Scarico Cartiera	28.3		°C
Salinità Scarico Cartiera	30		g/l
Densità Scarico Cartiera	1018.54529		Kg/mc
Calore specifico Scarico Cartiera	4076.71038		J/Kg °C
Portata Timavo	20		m ³ /s
Temperatura Timavo alle risorgive	13.7		°C
Portata Canale Moschenizze	2.4		m ³ /s
Temperatura Moschenizze (ponte autostrada)	17.3		°C
Portata Canale Tavoloni	2.2		m ³ /s
Temperatura ingresso Canale Tavoloni	17.3		°C
Livello iniziale di marea per lo stazionario	0.0		m slmm
Coefficiente di scambio termico con l'aria	10		W/m ² °C
Coefficiente di Strickler	42		m ^{1/3} s ⁻¹
Diffusività salina	0.002		m ² /s

Note:

(1) condizioni assunte uguali a quelle misurate in mare durante la campagna

(2) dati di letteratura

tab. 3.1 - Valori dei parametri utilizzati per la simulazione delle condizioni di massimo carico estivo

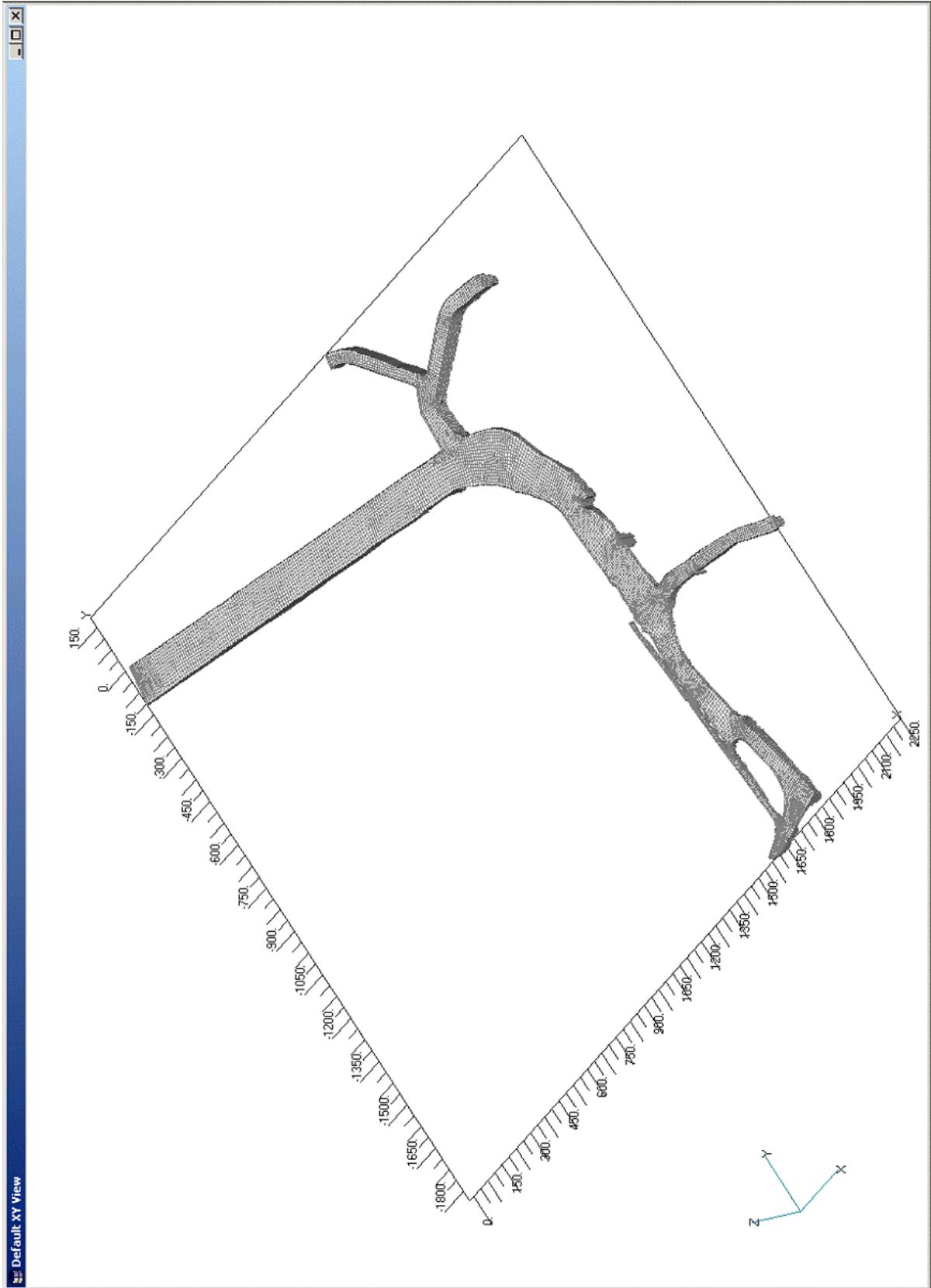


fig. 3.1 - Reticolo di calcolo generato per il modello 3D

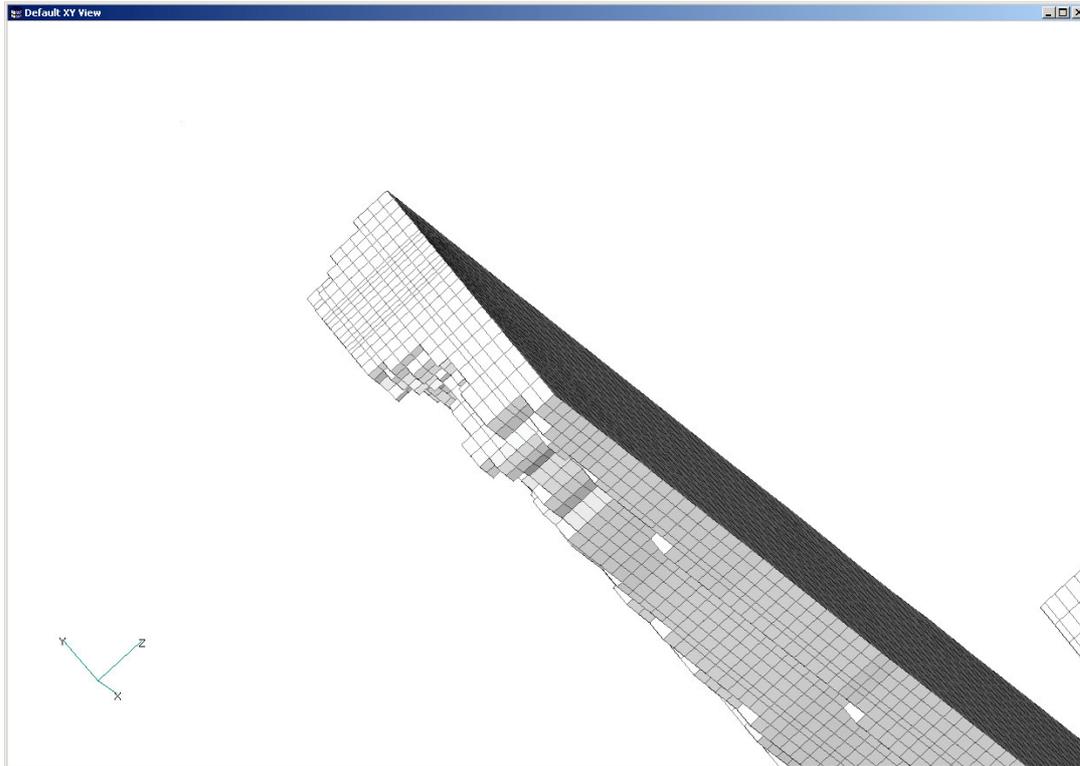


fig. 3.2 – Particolare del reticolo di calcolo 3D: zona di scarico della centrale

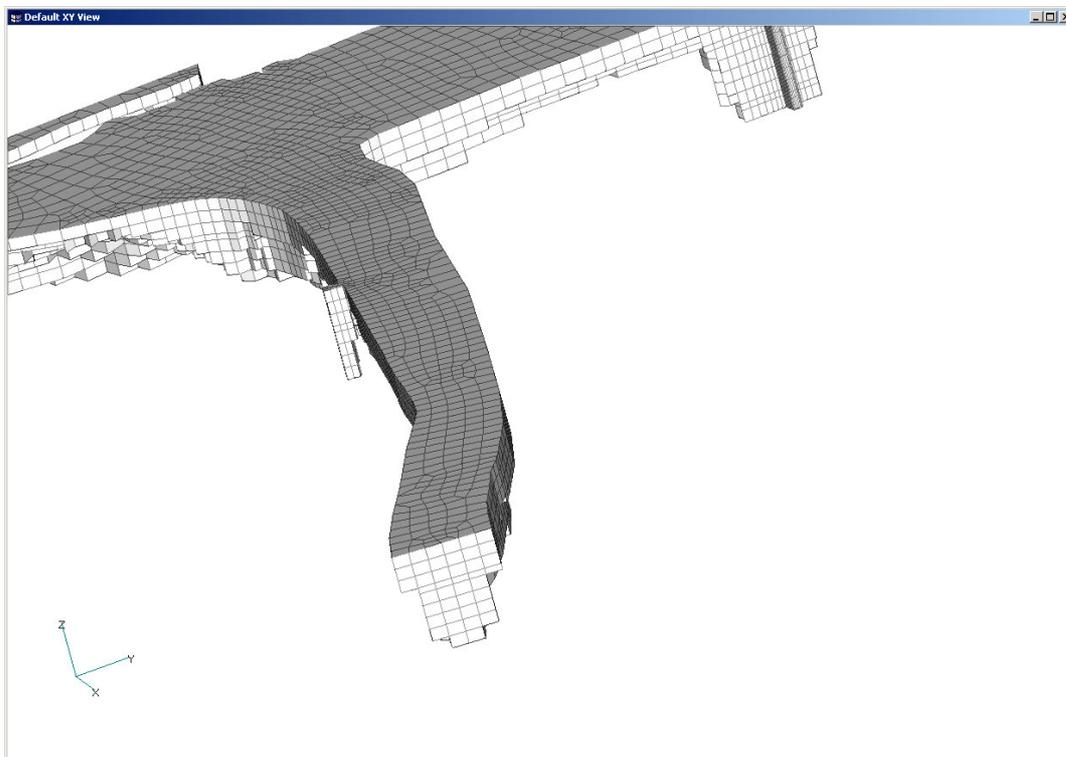


fig. 3.3 - Particolare del reticolo di calcolo 3D: confluenza del Locavaz e del Timavo

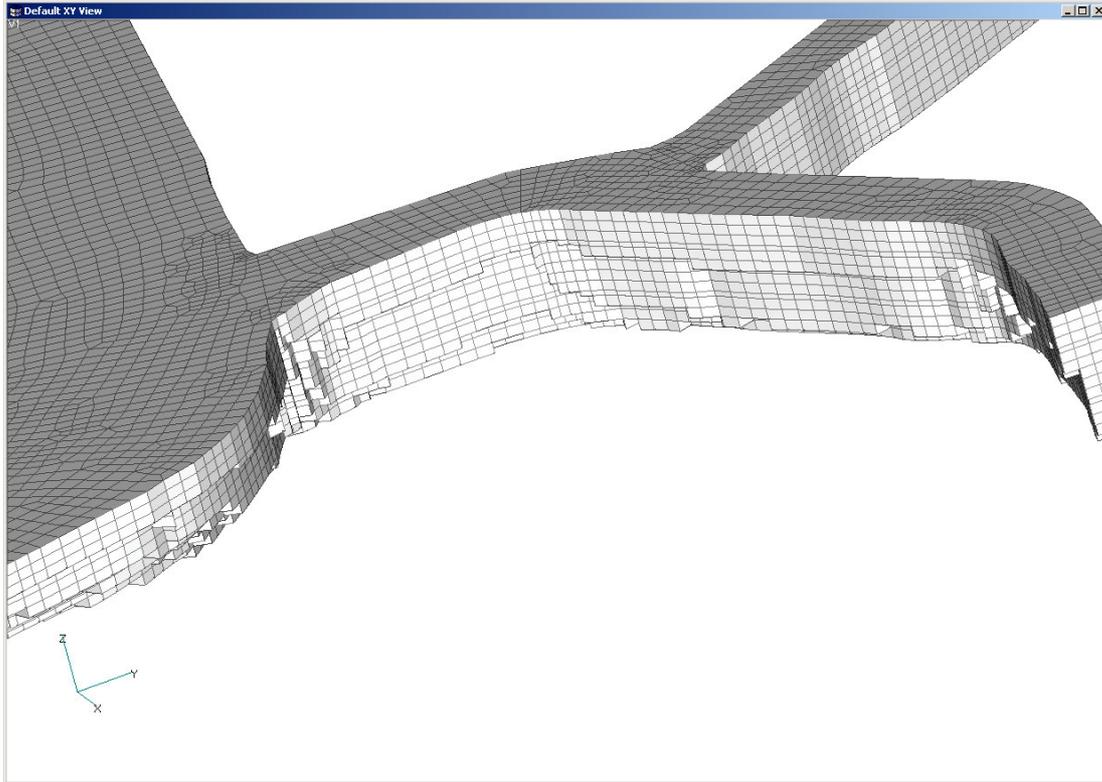


fig. 3.4 - Particolare del reticolo di calcolo 3D: confluenza tra i canali Lisert, Tavoloni e Moschenizze

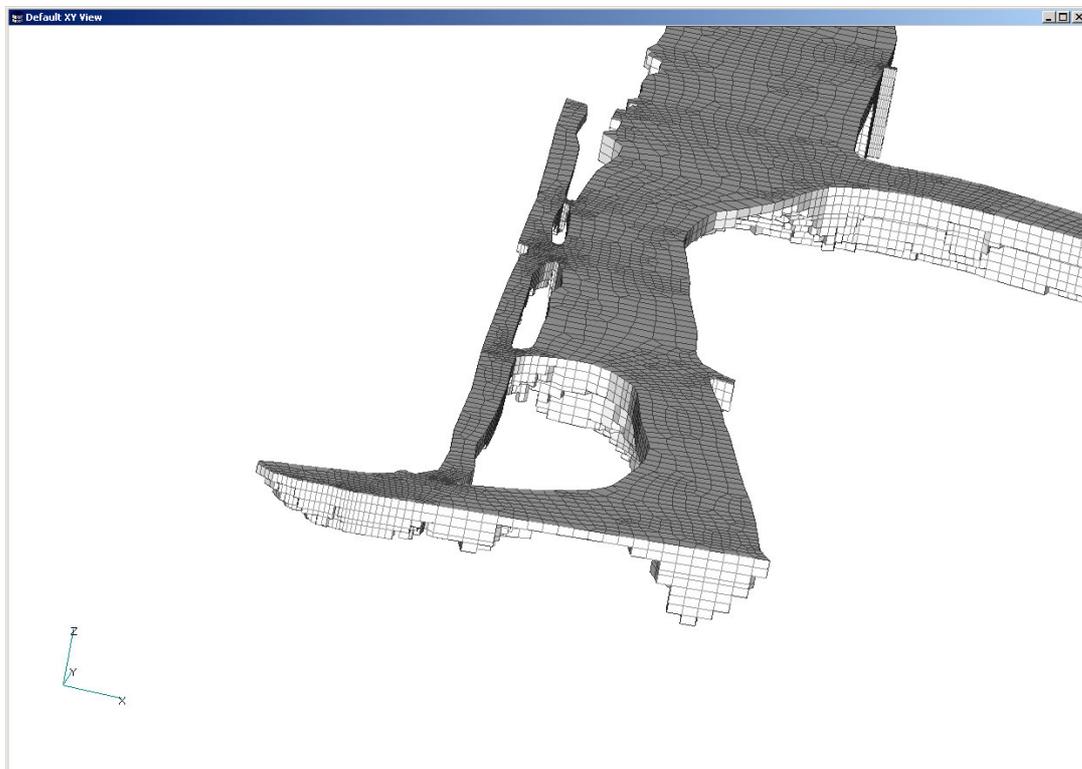


fig. 3.5 - Particolare del reticolo di calcolo 3D: zona di foce del Timavo

4 ANALISI DELLA DISPERSIONE TERMICA

4.1 Considerazioni preliminari

Nel corso dello studio sono state successivamente analizzate le simulazioni condotte nelle condizioni risultate più gravose ai fini della valutazione delle condizioni di scarico e del loro impatto sul sistema idrico interessato, sia nella configurazione attuale di centrale che nell'assetto a cicli combinati.

Il soddisfacente esito delle simulazioni condotte con il modello numerico tridimensionale qui utilizzato nelle stesse condizioni ambientali e di esercizio riscontrate nel corso di misure in campo, ampiamente documentate in [1], ha consentito di utilizzare il modello stesso per una analisi di tipo previsionale dell'effetto dello scarico della centrale qualora vengano considerate le condizioni di esercizio corrispondenti al pieno carico.

I risultati relativi a ciascuno degli scenari considerati sono stati analizzati sia graficamente sia mediante post processamento di tipo analitico allo scopo di estrarre l'insieme delle informazioni utili a caratterizzare il campo di moto, il campo termico ed il campo salino nell'intero dominio.

4.2 Analisi della dispersione termica nella configurazione attuale

4.2.1 Considerazioni generali

Per quanto riguarda le condizioni di simulazione, si fa riferimento alle condizioni tipiche estive, per poter meglio effettuare una valutazione dell'effetto dell'incremento del carico a parità di condizioni ambientali; d'altra parte, come già discusso nel capitolo relativo all'analisi delle condizioni ambientali stesse, i parametri relativi ai corsi d'acqua che alimentano il bacino considerato non sono soggetti a variazioni molto sensibili dei loro valori medi con le stagioni, ed il solo mare presenta condizioni molto diverse tra inverno ed estate.

Il modello 3D fornisce distribuzioni tridimensionali delle grandezze fisiche, calcolate tenendo conto, nelle ipotesi modellistiche descritte al capitolo precedente, realizzando una simulazione dinamica in transitorio, in quanto il variare del livello di marea alla sezione di foce comporta una variazione continua delle condizioni al contorno, con il contributo di acqua salata proveniente dal mare che entra nel sistema ed esce dal sistema con una frequenza semidiurna (ogni 12 ore si inverte la direzione del moto), cui si sovrappongono due componenti, una fredda dovuta ai contributi fluviali ed una calda e salata dovuta allo scarico della centrale.

Questa dinamica non consente ovviamente il raggiungimento di uno stato di equilibrio stazionario, e quindi è stato necessario, per evitare l'introduzione di elementi perturbativi di tipo numerico durante l'inizializzazione del calcolo, effettuare dapprima una simulazione stazionaria con tutte le condizioni di flusso al contorno pienamente applicate ma in assenza di marea, in cui cioè alla sezione a marea non è applicata alcuna condizione esterna ("open condition"), ed applicare successivamente, partendo da una tale condizione stabilizzata l'effetto di marea (stato transitorio continuo). Un tale stato stazionario, necessario per inizializzare il transitorio di marea, non ha ovviamente un riscontro fisico nel comportamento effettivo del corpo idrico, che non può mai prescindere dalla marea, tuttavia esso verrà riportato in uno dei successivi paragrafi allo scopo di evidenziare la totale diversità di comportamento che avrebbe il sistema idrico in assenza della marea.

Va infine ricordato che, a causa delle limitate dimensioni verticali del dominio (dell'ordine della decina di metri) rispetto alle sue dimensioni orizzontali (1950x2250 m), tutte le analisi in forma grafica sono state condotte considerando un fattore di scala pari a 10 per la dimensione verticale, in modo da poter evidenziare gli andamenti anche in questa direzione.

4.2.2 Stato stazionario di inizializzazione: analisi dei risultati

In primo luogo è stato analizzato lo stato di equilibrio stazionario propedeutico alla simulazione del transitorio di marea, nelle condizioni di esercizio a pieno carico; esso è stato raggiunto dopo un periodo di tempo simulato pari a tre giorni (51840 passi di calcolo di 5 s ciascuno), partendo da uno stato iniziale di acqua fredda e dolce ovunque, in stato di quiete, ed imponendo le corrispondenti condizioni di immissione di acqua calda e salata alla sezione di scarico della centrale, di acqua calda e parzialmente salata alla sezione di scarico della cartiera, di acqua dolce e fredda alle sezioni aperte di ingresso per i canali Tavoloni e Moschenizze, nonché alla sezione di ingresso del fiume Timavo. Le condizioni di temperatura e di portata imposte sono quelle indicate in tab. 3.1.

L'andamento generale del flusso idrodinamico e della distribuzione di temperatura e salinità che ne deriva assume un andamento caratteristico del sistema idrico considerato, e precisamente:

- a) in fig. 4.1 è riportato l'andamento del campo di moto in termini di velocità totale. Si può immediatamente notare che il moto nell'intero bacino è controllato da due sorgenti principali: lo scarico sommerso della centrale ed il fiume Timavo; il primo determina principalmente le condizioni di moto nel canale Lisert e nel canale collettore mentre il secondo aggiunge una forte componente di velocità nel tratto finale fino alla foce. Si notano in particolare elevati valori di velocità, superiori a 0.25 m/s e con punte fino a 1.5 m/s, nella zona antistante lo scarico, per un tratto di circa 200 m, e nel tratto del Locavaz e del Timavo, con una accelerazione causata anche dal restringimento parziale dell'alveo e dalla sua conformazione batimetrica, oltretutto dal contributo delle acque del Timavo. Il campo di moto che si instaura in queste zone è analizzato in dettaglio nella fig. 4.2; per quanto riguarda lo scarico, le cui componenti di velocità nei diversi elementi del dominio sono riportati con frecce di lunghezza proporzionale al modulo della velocità, si nota una zona di stagnazione a ridosso dello scarico stesso a rive destra, con un moto che si sviluppa pienamente nel Lisert solo dopo almeno 200 m. Per quanto riguarda la zona della confluenza con il Timavo, si pone in netta evidenza la componente di corrente ivi presente, accanto invece alla zona di morta corrispondente al ramo stretto in sponda destra;
- b) la simulazione qui discussa è stata eseguita in condizioni stazionarie senza l'applicazione della marea, per cui il livello alla sezione di foce è pari al livello di medio mare. La fig. 4.3 mostra l'andamento della elevazione superficiale dell'intero dominio conseguente allo stato di equilibrio idrodinamico raggiunto; il livello idrico si innalza progressivamente dalla foce verso le sorgenti del Moschenizze, da 0 m s.l.m. a circa 0.13 m s.l.m.;
- c) è stato poi analizzato l'andamento della distribuzione di temperatura, riportato in fig. 4.4 per l'intero dominio. Risulta immediatamente evidente l'effetto della quantità di calore scaricata dalla centrale, in particolare nel tratto del Locavaz dove si ha un pennacchio termico abbastanza marcato che interessa tutta la sezione dell'alveo, seppur con temperature più elevate verso la sponda destra. L'incontro con le acque molto fredde e veloci del Timavo determina un brusco cambiamento nella distribuzione di

temperatura, con il pennacchio caldo che tende a comprimersi nella semisezione di destra dell'alveo, ma che in media aumenta per miscelamento la temperatura in tutta la sezione. Alla foce, come mostrato in dettaglio in fig. 4.5, si hanno nella sezione temperature che vanno dai 21 °C ai 30 °C, a seconda della verticale scelta;

- d) se si esamina l'andamento dei gradienti di temperatura di fig. 4.6, si nota immediatamente l'assenza di gradienti sensibili nel canale Lisert, completamente riscaldato, mentre risulta bassa l'efficienza del miscelamento nel tratto del Locavaz, con gradienti più deboli. Analogo comportamento si verifica, seppur in misura meno marcata, dato comunque il sensibile apporto di acqua fredda del Timavo, a valle della confluenza del Locavaz col Timavo stesso;
- e) anche la salinità, come si vede nelle figure dalla fig. 4.7 alla fig. 4.9, ha un andamento simile a quello discusso per la temperatura, con un incremento della concentrazione media in tutto il Locavaz, fino alla foce, con valori compresi tra 8 e 33 g/l, a seconda della verticale considerata.

4.2.3 Simulazione del transitorio di marea: analisi dei risultati nelle condizioni di minimo crescente

La condizioni di esercizio a pieno carico in condizioni stazionarie ha consentito di avere una prima idea di come i diversi corpi idrici del sistema si influenzano reciprocamente; ciò consente di valutare meglio l'effetto che la marea, risalendo il corso del Timavo e del Locavaz, ha sull'idrodinamica del sistema e quindi sulla dispersione del pennacchio termico proveniente dallo scarico. In particolare la marea, con un ritmo semidiurno, alza ed abbassa il livello del mare alla foce rispetto al livello medio imperturbato, forzando acqua di mare in ingresso al sistema e successivamente invertendone il moto. Si determina quindi una sorta di azione di pompaggio di acqua di mare nel sistema Lisert-Timavo che raggiunge i valori massimi in corrispondenza del minimo crescente e del massimo decrescente presenti nell'andamento periodico del livello di marea. Qui di seguito viene esaminata la condizione di dispersione che si determina nel sistema in corrispondenza del minimo crescente, mentre nel paragrafo successivo viene esaminata la condizione di massimo.

Analizzando i risultati della simulazione emerge che:

- a) in fig. 4.10 è riportato l'andamento del campo di moto in termini di velocità totale. Si può immediatamente notare la differenza strutturale del campo di moto che si presenta ora stratificato sul piano orizzontale, anche nel tratto successivo alla confluenza del Locavaz nel Timavo. Si notano in particolare elevati valori di velocità, superiori a 0.3 m/s e con punte fino a 1. m/s, nella zona antistante lo scarico, per un tratto di circa 400 m, e valori dell'ordine di 0.8 m/s nel tratto del Locavaz e del Timavo, con una accelerazione causata anche dal restringimento parziale dell'alveo e dalla sua conformazione batimetrica, oltreché dal contributo delle acque del Timavo e dal fatto che, rispetto alle condizioni stazionarie, le acque di scarico e quelle fredde scorrono al di sopra di quelle pilotate dalla marea. Per meglio porre in evidenza le peculiarità del campo di moto, sono state considerate alcune sezioni caratteristiche, riportate anche in fig. 2.1, per le quali si verifica che:

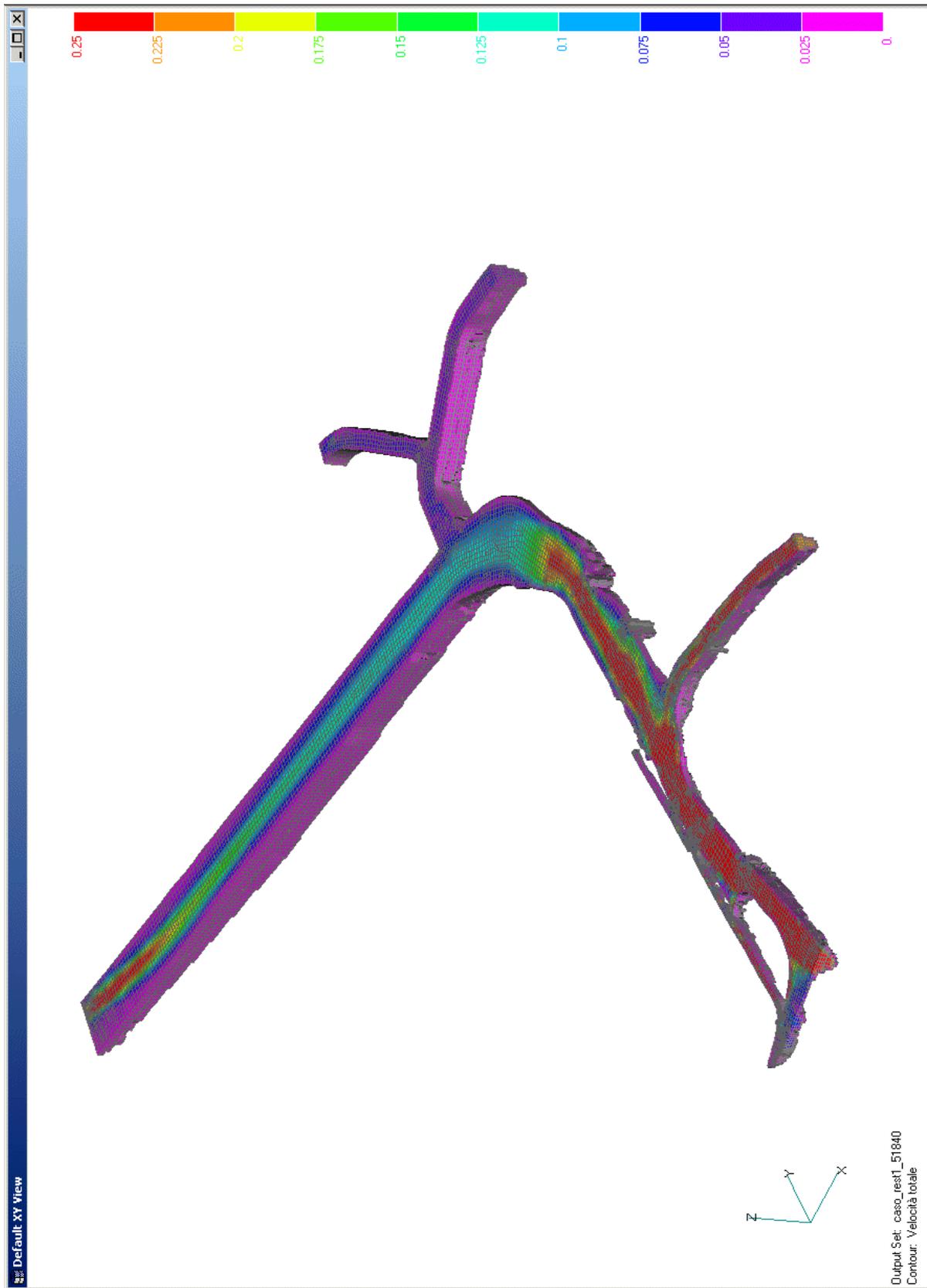


fig. 4.1 – Assetto attuale.Stato stazionario a pieno carico. Andamento della velocità (m/s)

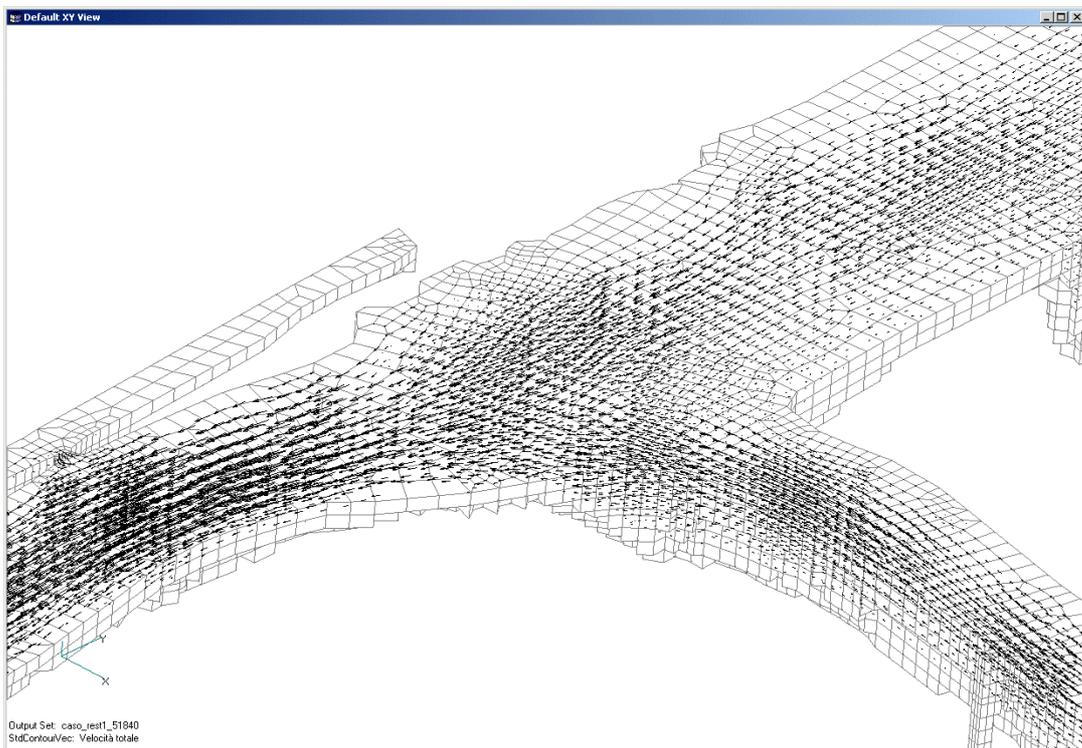
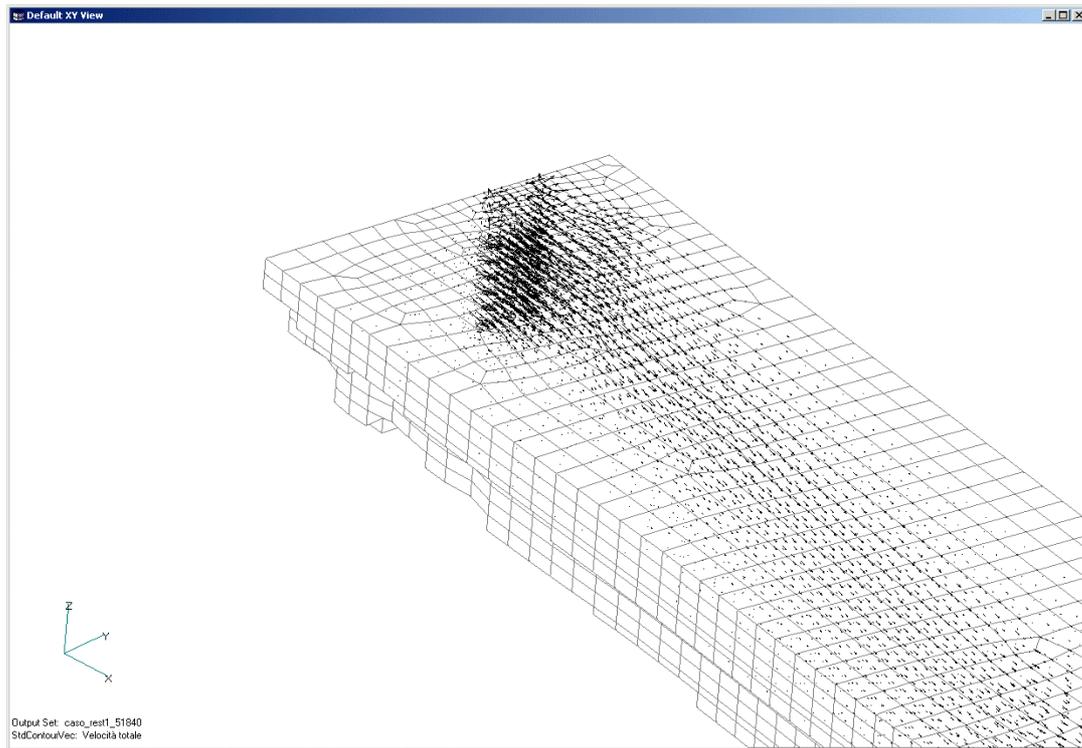


fig. 4.2 - Assetto attuale. Stato stazionario a pieno carico. Particolari del campo di moto nella zona dello scarico della Centrale e nella zona di confluenza con il fiume Timavo

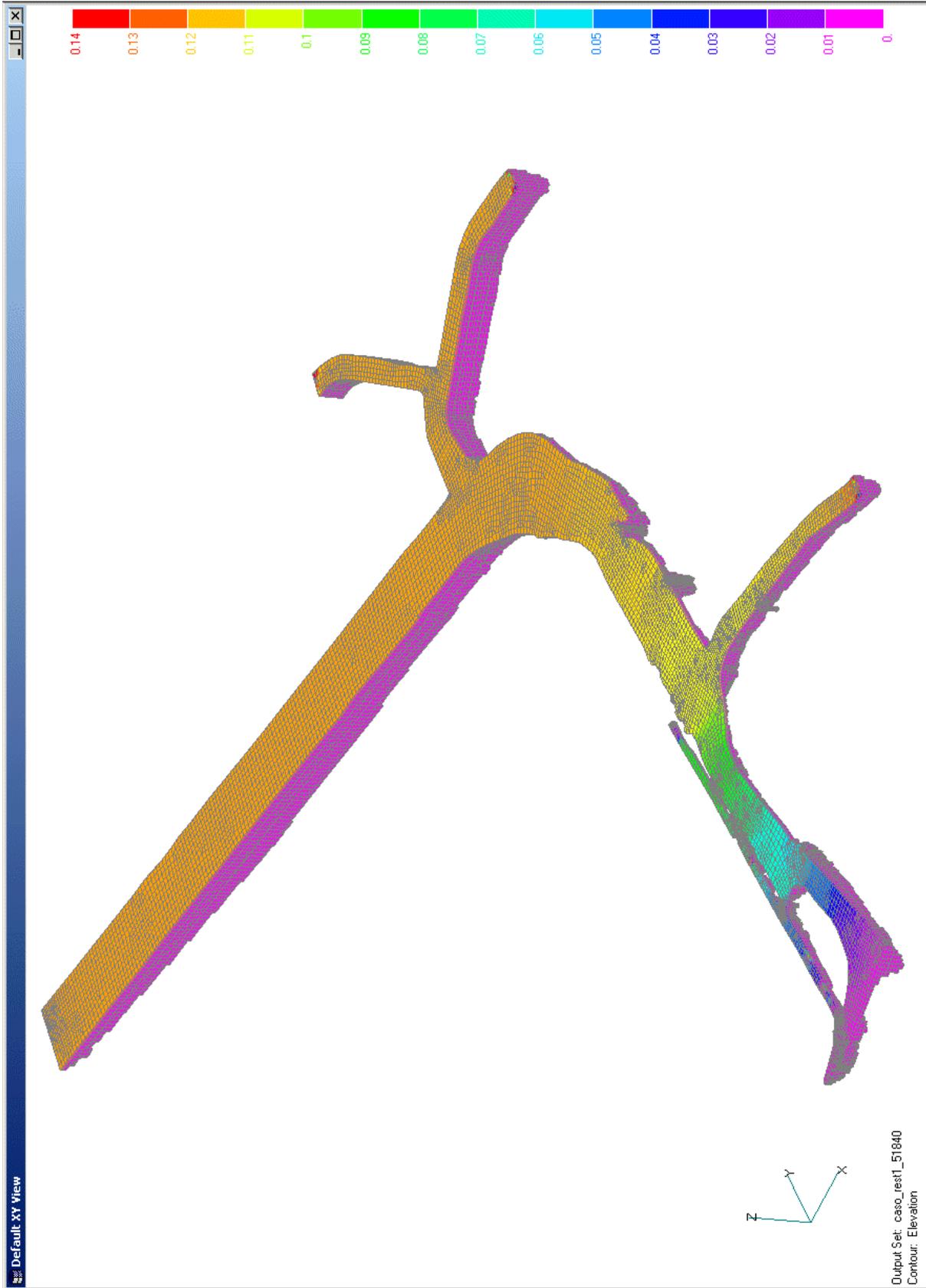


fig. 4.3 - Assetto attuale.Stato stazionario a pieno carico. Andamento della elevazione rispetto al medio mare (m)

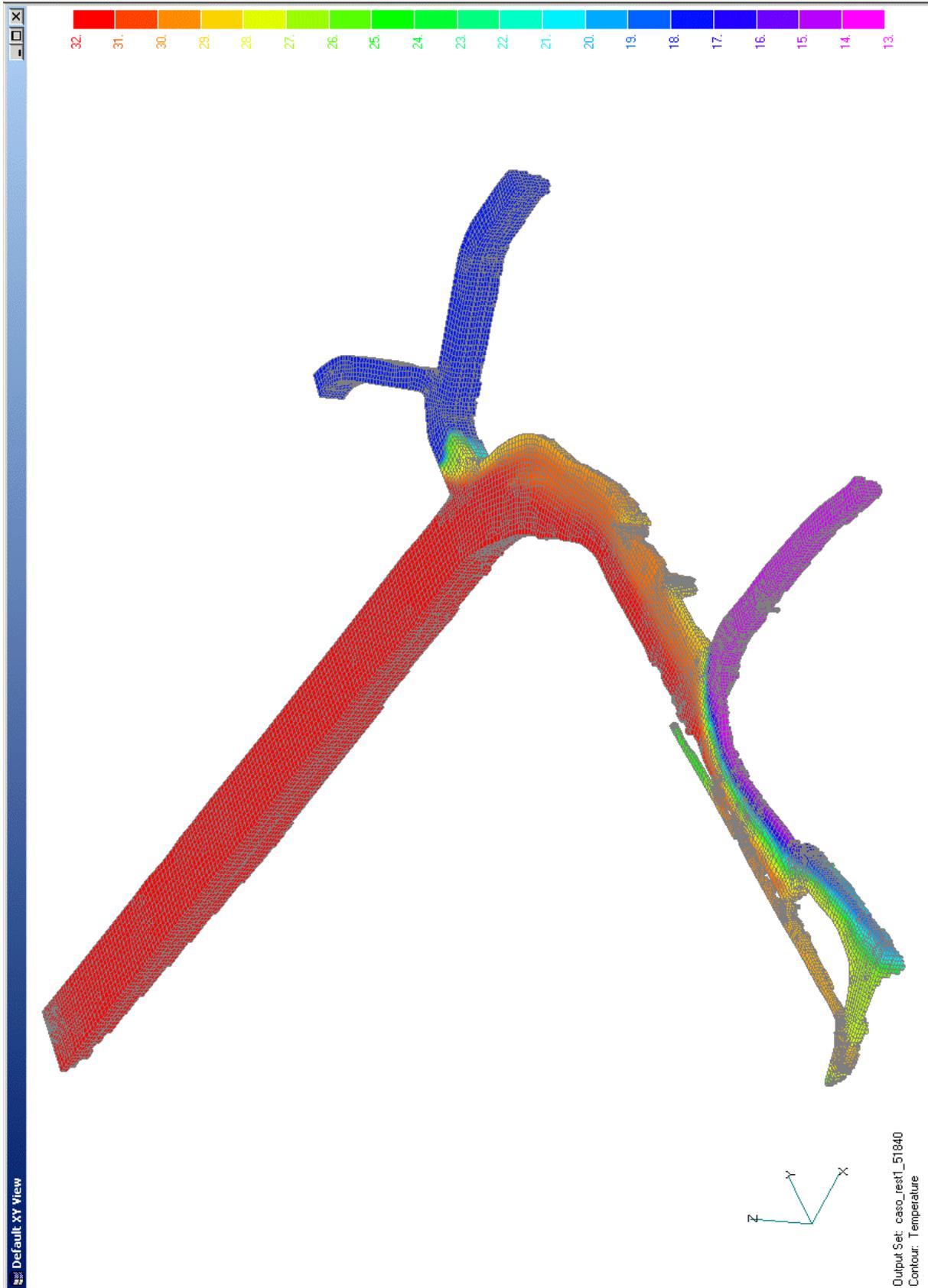


fig. 4.4 - Assetto attuale. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della temperatura (°C)

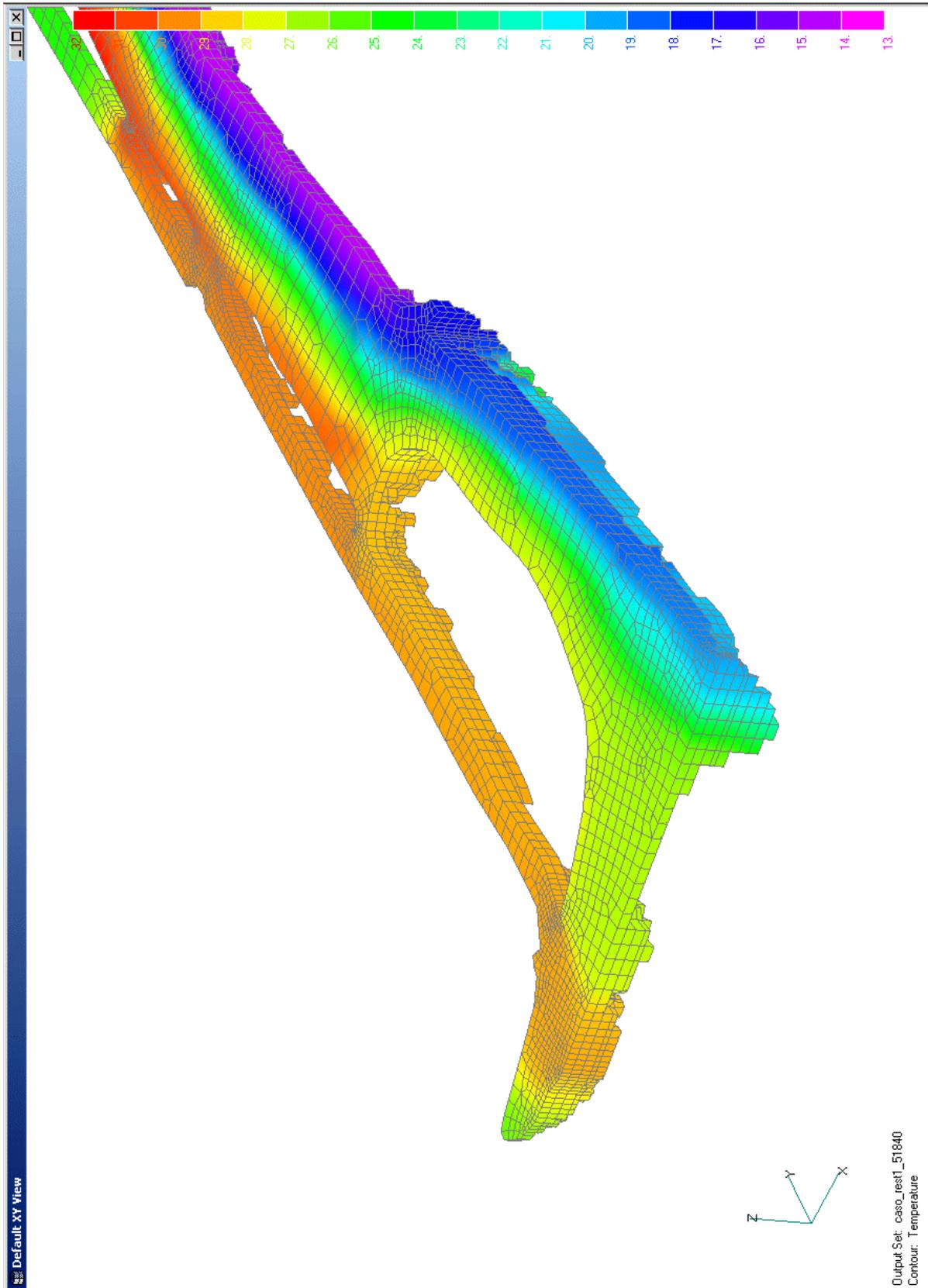


fig. 4.5 - Assetto attuale.Stato stazionario a pieno carico. Andamento della temperatura (°C). Particolare della zona della foce

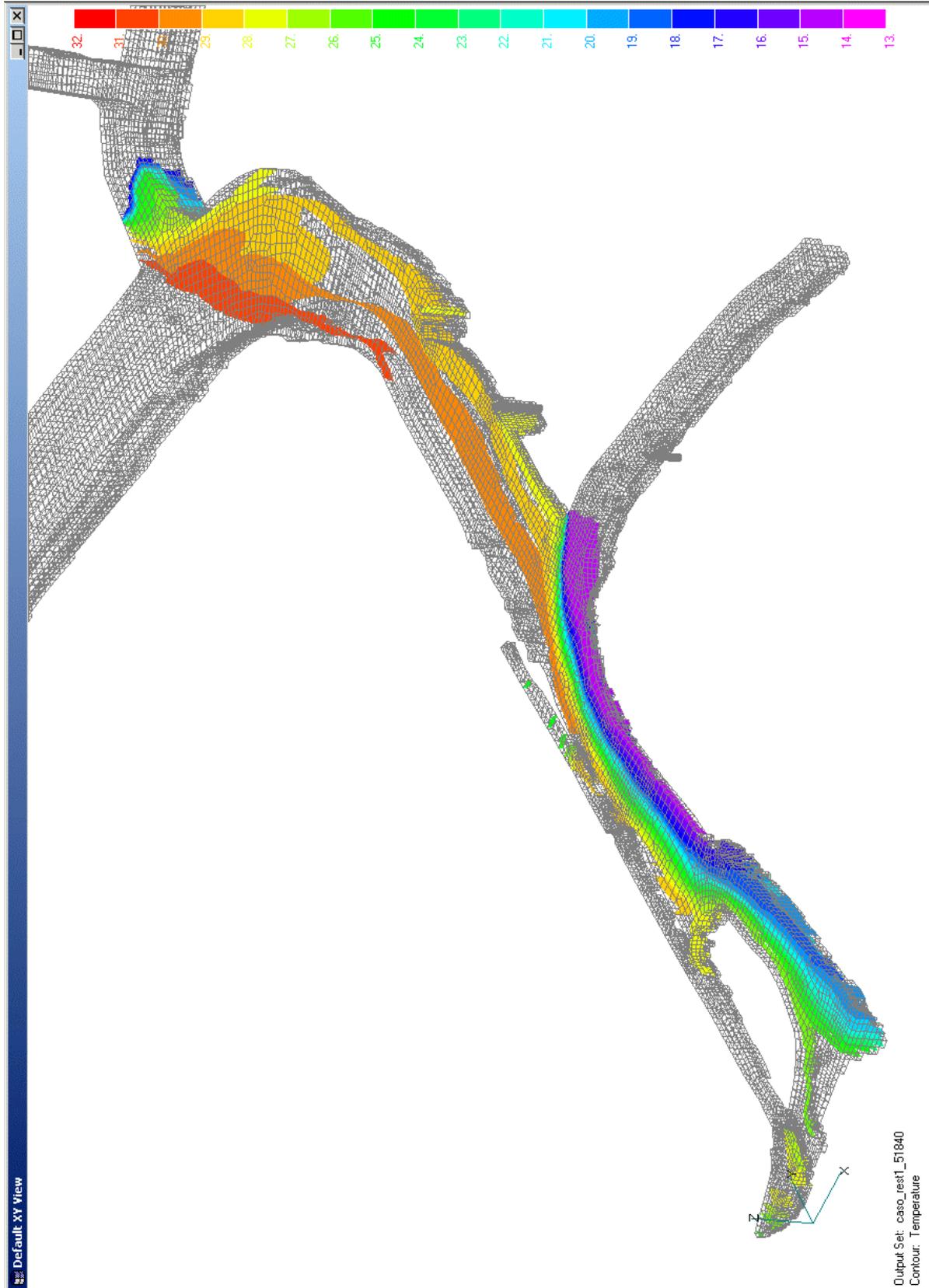


fig. 4.6 - Assetto attuale. Stato stazionario a pieno carico. Andamento dei gradienti di temperatura (°C)

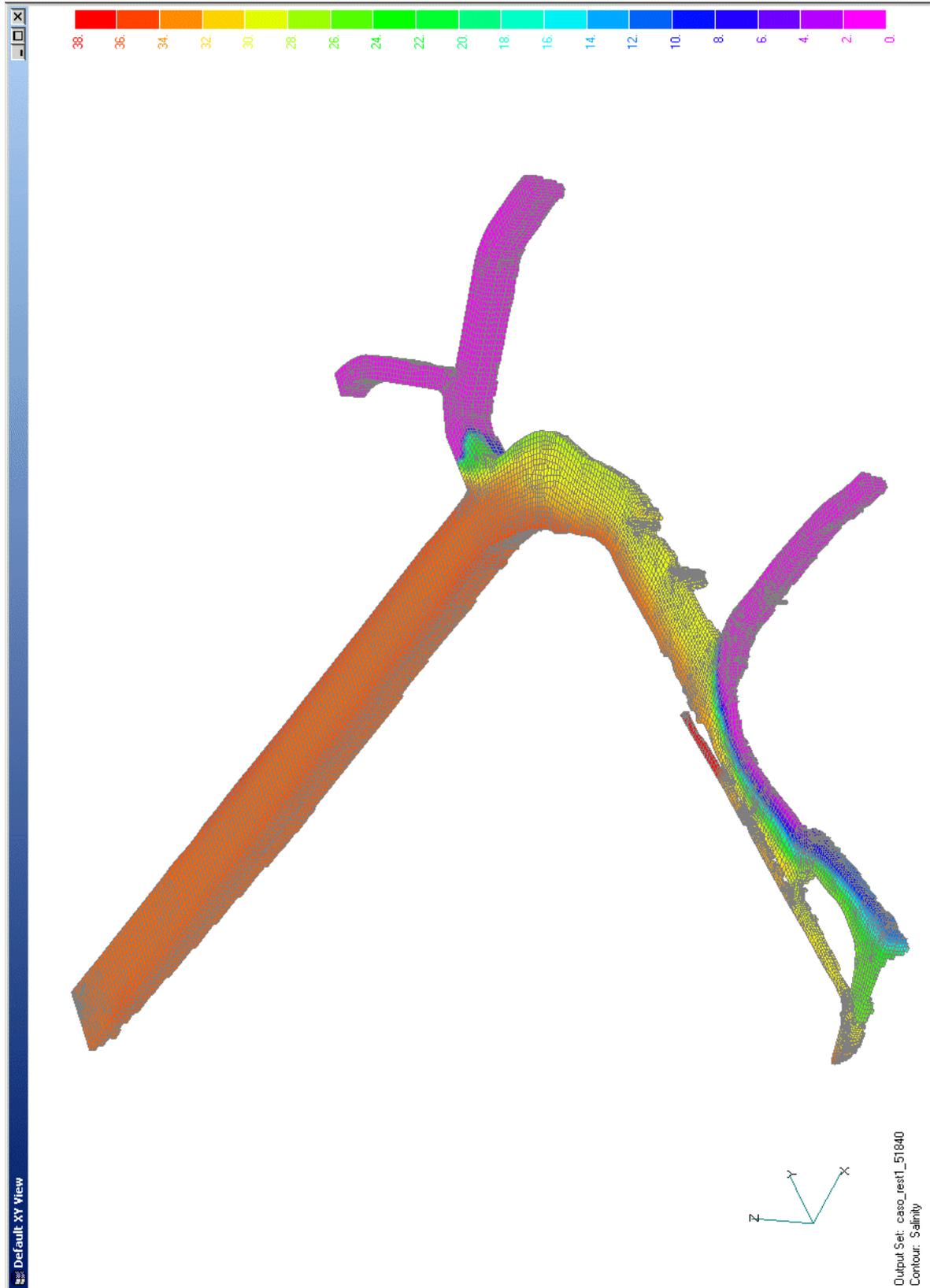


fig. 4.7 - Assetto attuale. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della salinità (g/l)

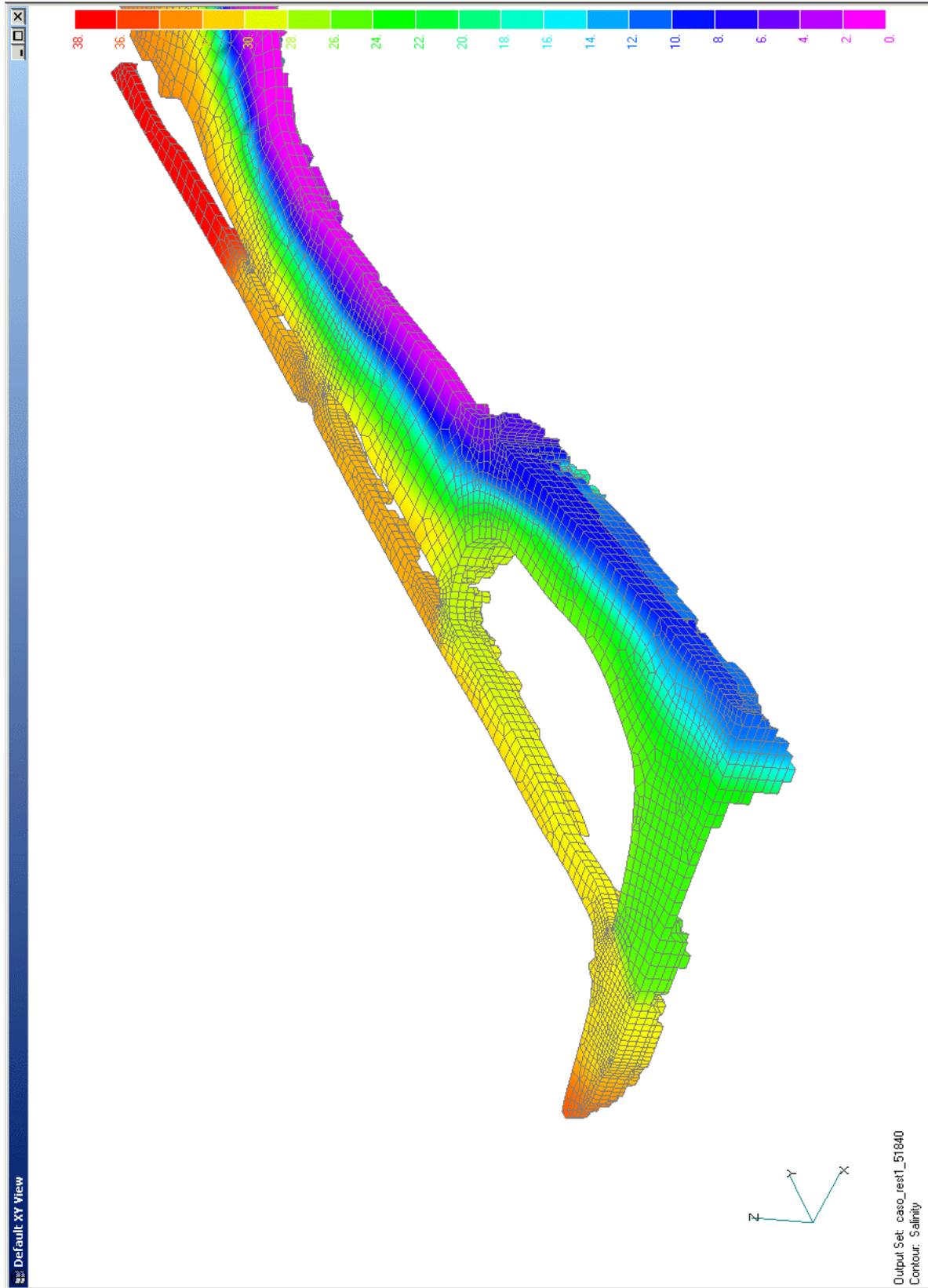


fig. 4.8 - Assetto attuale. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della salinità (g/l). Particolare della zona della foce

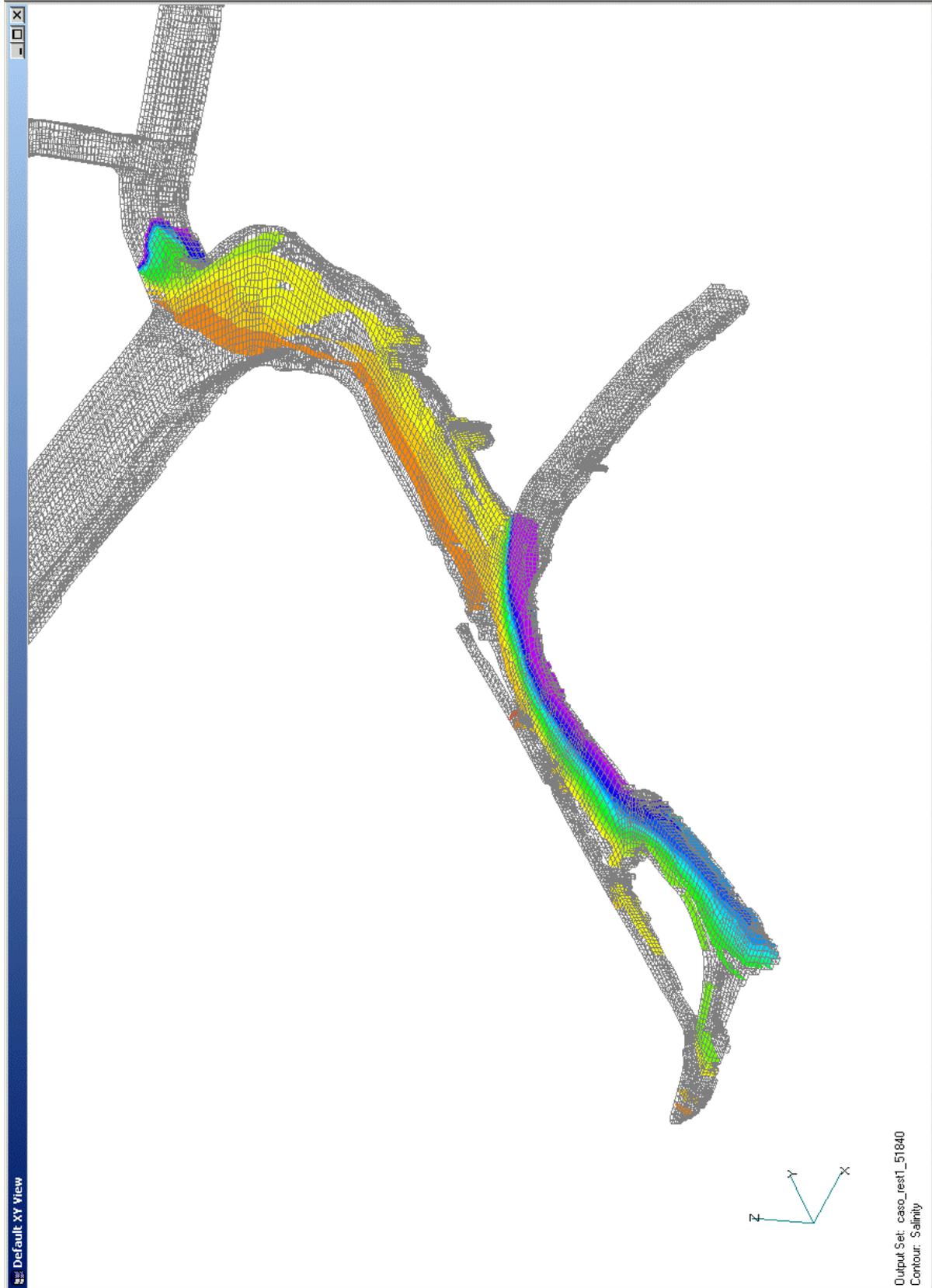


fig. 4.9 - Assetto attuale. Stato stazionario a pieno carico. Andamento dei gradienti di salinità (g/l)

- per quanto riguarda la sezione 2, collocata al termine del canale Lisert, il campo di moto è mostrato in dettaglio nella fig. 4.11. E' immediato constatare la presenza di due strati principali, l'uno superficiale, con velocità di poco superiori a 0.12 m/s, in cui scorre l'acqua più fredda proveniente dal Moschenizze, e l'altro, profondo ed ampio, in cui scorre verso il Locavaz l'acqua calda e salata proveniente dallo scarico; i due strati sono separati, a circa 1 m di profondità da una regione di scorrimento con velocità molto bassa;
 - per quanto riguarda la sezione 5, collocata prima della confluenza del Locavaz con il Timavo, il campo di moto nella sezione verticale è mostrato in dettaglio nella fig. 4.12. In questo caso, si ha un nucleo di scorrimento veloce (0.3÷0.4 m/s) dell'acqua fredda superficiale e di quella calda e salata del pennacchio nella regione superficiale verso sponda destra, mentre il resto della sezione è interessato, alle profondità maggiori e verso sponda sinistra, da velocità inferiori (0.15 m/s in media);
 - per quanto riguarda la sezione 8, collocata qualche centinaio di metri dopo della confluenza del Locavaz con il Timavo, il campo di moto nella sezione verticale è mostrato in dettaglio nella fig. 4.13. In questo caso, si evidenziano valori di circa 0.6 m/s alla superficie in corrispondenza della verticale più profonda, e valori di 0.2÷0.3 m/s per le altre verticali;
- b) in fig. 4.14 è riportato l'andamento del campo di temperatura per l'intero dominio. Partendo dalla considerazione che sono presenti tre principali sorgenti termiche, quella calda dello scarico della centrale, quella fredda del Moschenizze e del Tavoloni e quella ancora più fredda del Timavo, in quanto l'impatto dello scarico della cartiera è percepibile solo localmente, si constata immediatamente come la distribuzione della temperatura, in superficie e negli strati inferiori, è ora condizionata in modo fondamentale dalla marea, crescente dal valore minimo nelle condizioni qui considerate, oltreché dallo scarico della centrale. In primo luogo, il canale Lisert presenta una risalita di acqua dolce e fredda dal Moschenizze per la quasi totalità della sua lunghezza, che interessa uno strato superficiale variante da 0.5 ad 1 m, ad eccezione della zona immediatamente antistante lo scarico ove la turbolenza mantiene l'acqua calda fino in superficie. Questa stratificazione si presenta anche nel successivo tratto del Locavaz, pressoché con le stesse proprietà, finché non si arriva alla confluenza con il Timavo. L'arrivo di acqua dolce in quantità rilevante, oltreché più fredda, accentua la stratificazione abbassando il valore della temperatura media nello strato superficiale. Per quanto riguarda lo strato inferiore, esso è abbastanza omogeneo nel tratto del Locavaz, ove l'acqua calda e salata proveniente dalla centrale si è praticamente ben mescolata, mentre invece oltre la confluenza con il Timavo si manifesta evidente l'effetto dell'arrivo di acqua più salata dal mare, essendo la marea montante. Questo andamento per strati orizzontali è particolarmente evidente se si esamina la fig. 4.15; essa infatti mostra l'andamento dei gradienti di temperatura, nei valori corrispondenti alla scala a fianco indicata, che danno un'idea dei fronti di temperatura che si muovono nel dominio. A differenza di quanto riscontrato nello stato stazionario, ora i gradienti sono distribuiti verticalmente, e la parte inferiore del dominio risulta assai omogenea, in particolare nel canale Lisert (condizioni medie di scarico) ed in prossimità della foce (condizioni dell'acqua di mare). Per meglio porre in evidenza le peculiarità del campo di temperatura, sono state considerate le sezioni in cui sono state effettuate misure di questo parametro, ed in corrispondenza ad esse è stata considerata la corrispondente sezione verticale del dominio di calcolo. Si può constatare che:

- per quanto riguarda la sezione 2, collocata al termine del canale Lisert, la distribuzione di temperatura è mostrata in dettaglio nella fig. 4.16. Si mantiene la struttura fondamentale a due strati verticali, anche se ora l'effetto di miscelamento è evidente al di sotto dello strato freddo superficiale;
 - per quanto riguarda la sezione 4, collocata dopo la confluenza Lisert-Moschenizze, la distribuzione di temperatura è mostrata in dettaglio nella fig. 4.17. Si mantiene la struttura fondamentale a due strati verticali, come nella sezione precedente, e lo strato superficiale, di spessore intono agli 80 cm è ad una temperatura media intorno ai 25 °C;
 - per quanto riguarda la sezione 5, collocata prima della confluenza del Locavaz con il Timavo, la distribuzione di temperatura nella sezione verticale è mostrata in dettaglio nella fig. 4.18. Non vi sono sostanziali differenze rispetto all'andamento della sezione 4;
 - per quanto riguarda la sezione 8, collocata qualche centinaio di metri dopo della confluenza del Locavaz con il Timavo, permane la stratificazione verticale, che però diviene più complessa per l'apporto delle acque del Timavo, come mostrato in fig. 4.19;
- c) nella fig. 4.20 è invece riportata la distribuzione della salinità nel dominio. Essa assume di fatto un andamento molto simile a quello della temperatura, essendo anch'essa condizionata sia dalla marea che dallo scarico della centrale, e presenta un andamento stratificato esattamente corrispondente a quello della temperatura.

Infine, nelle condizioni di pieno carico e minimo livello di marea qui considerate, si constata la presenza nella sezione di foce di uno strato caldo e salato, compreso tra uno strato superficiale freddo ed uno strato salato freddo profondo, avente temperatura dell'ordine di 30 °C, superiore quindi di circa 3.5 °C alla temperatura considerata per l'acqua di mare, come effetto della dispersione termica delle acque di raffreddamento della centrale.

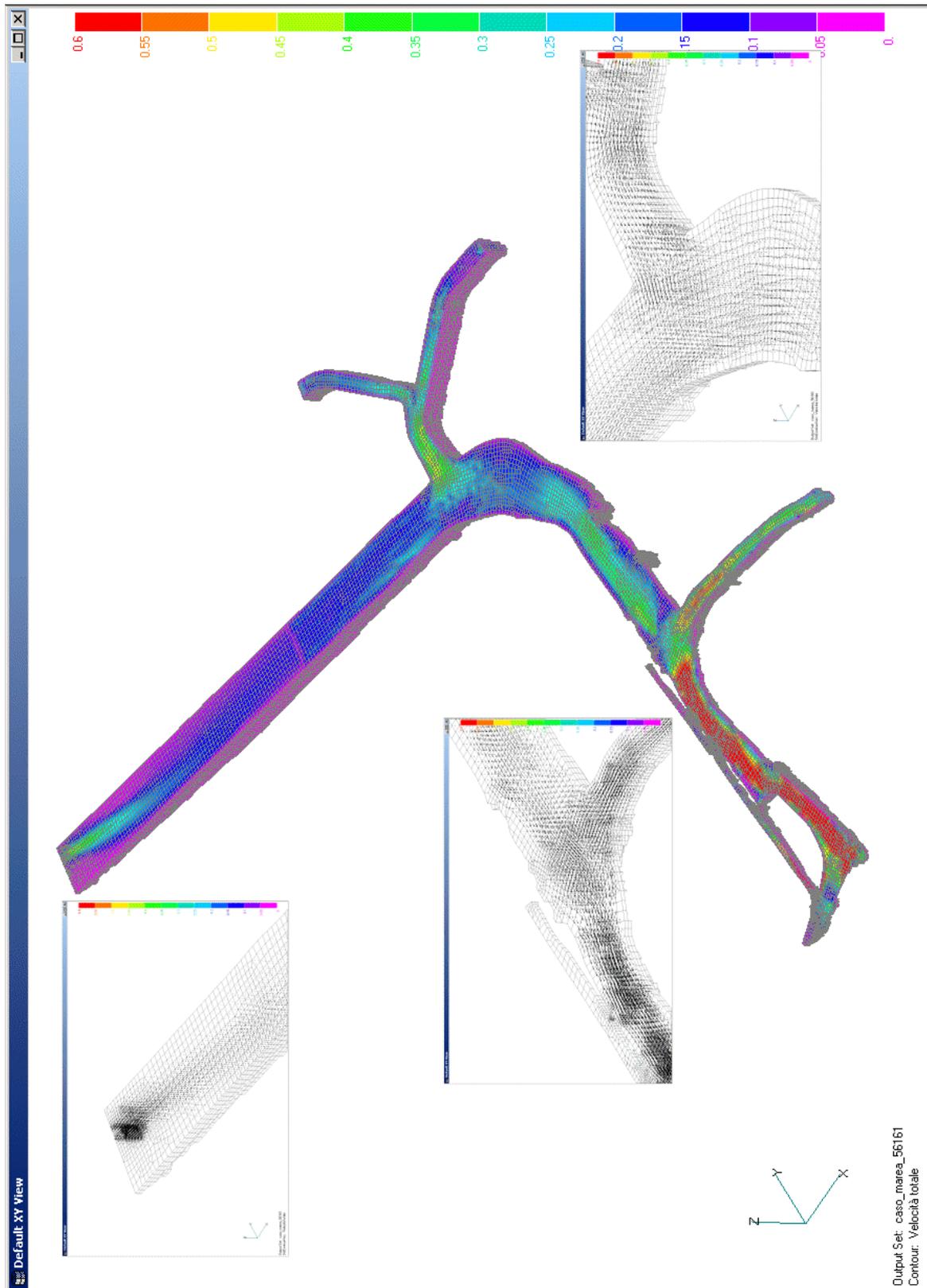


fig. 4.10 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento della velocità (m/s)

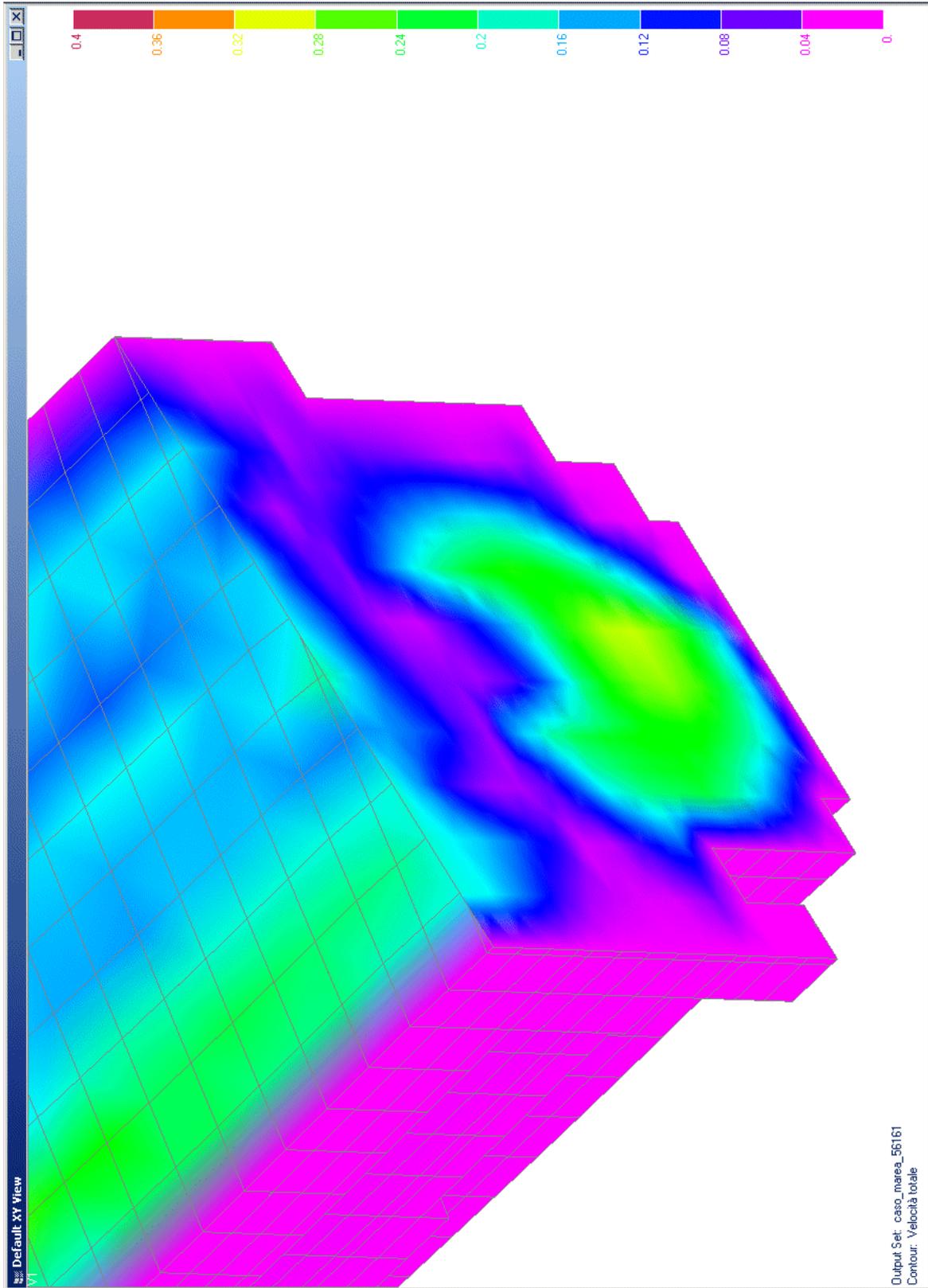


fig. 4.11 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 2 (m/s)

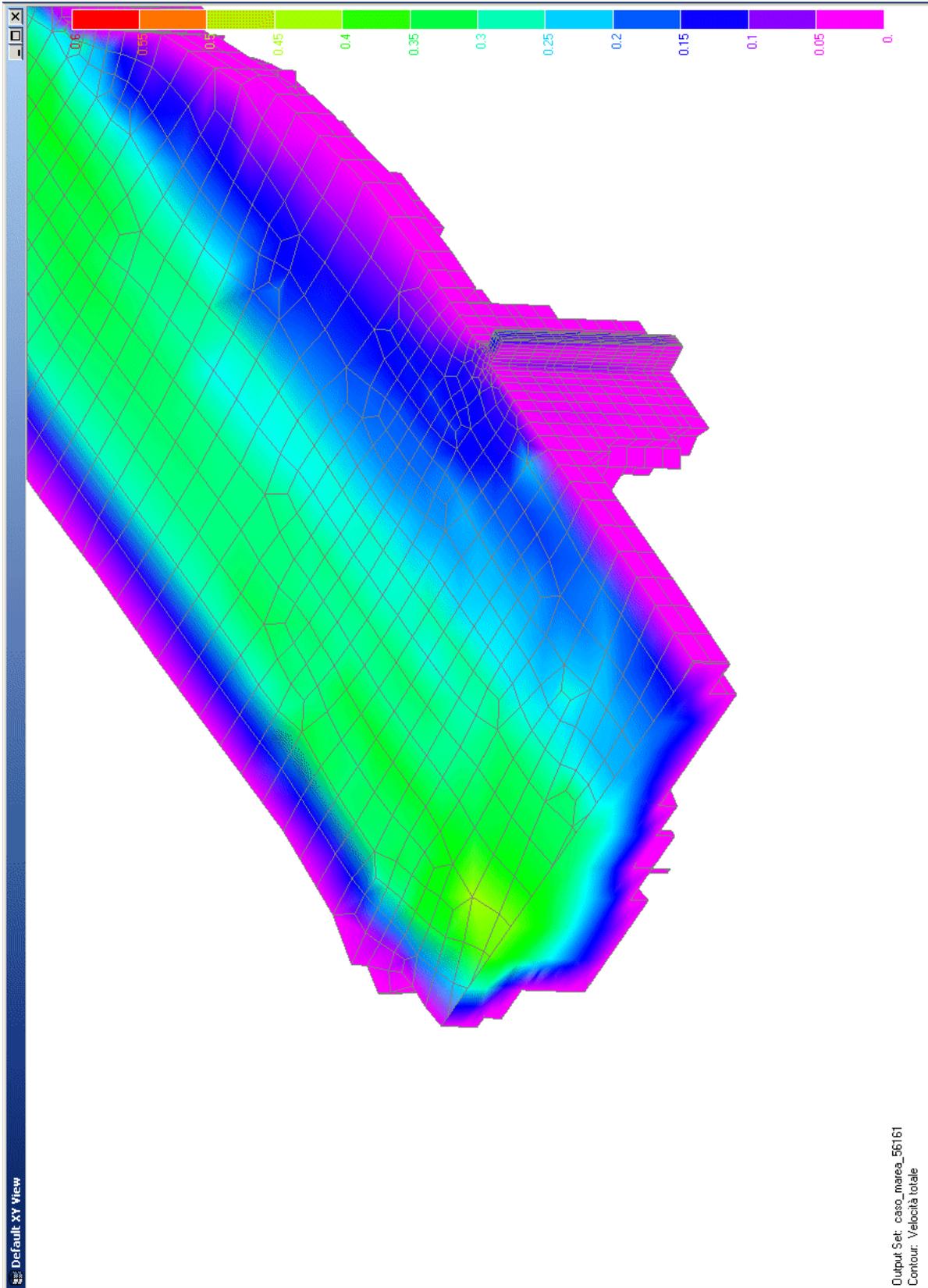


fig. 4.12 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 5 (m/s)

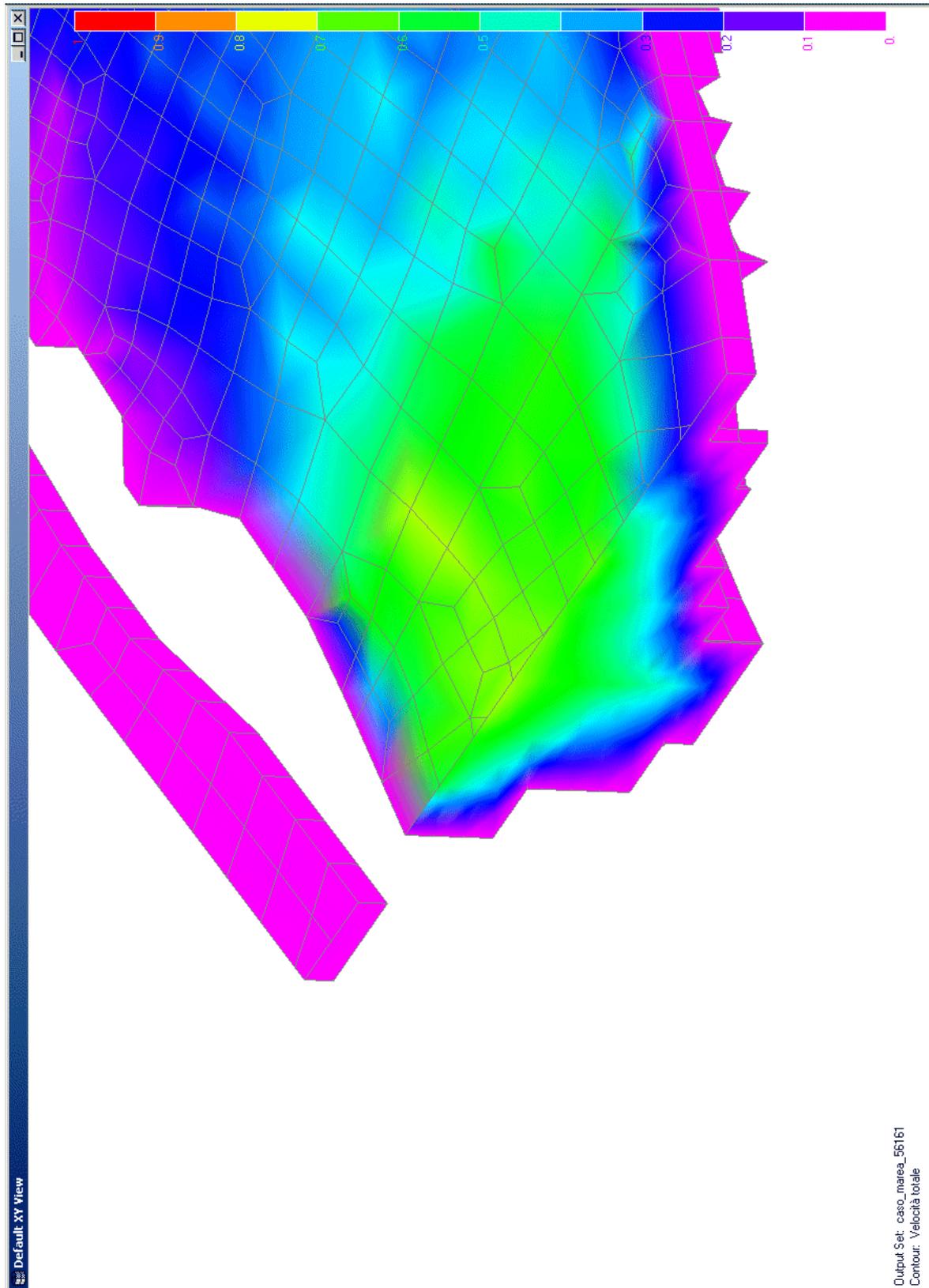


fig. 4.13 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 8 (m/s)

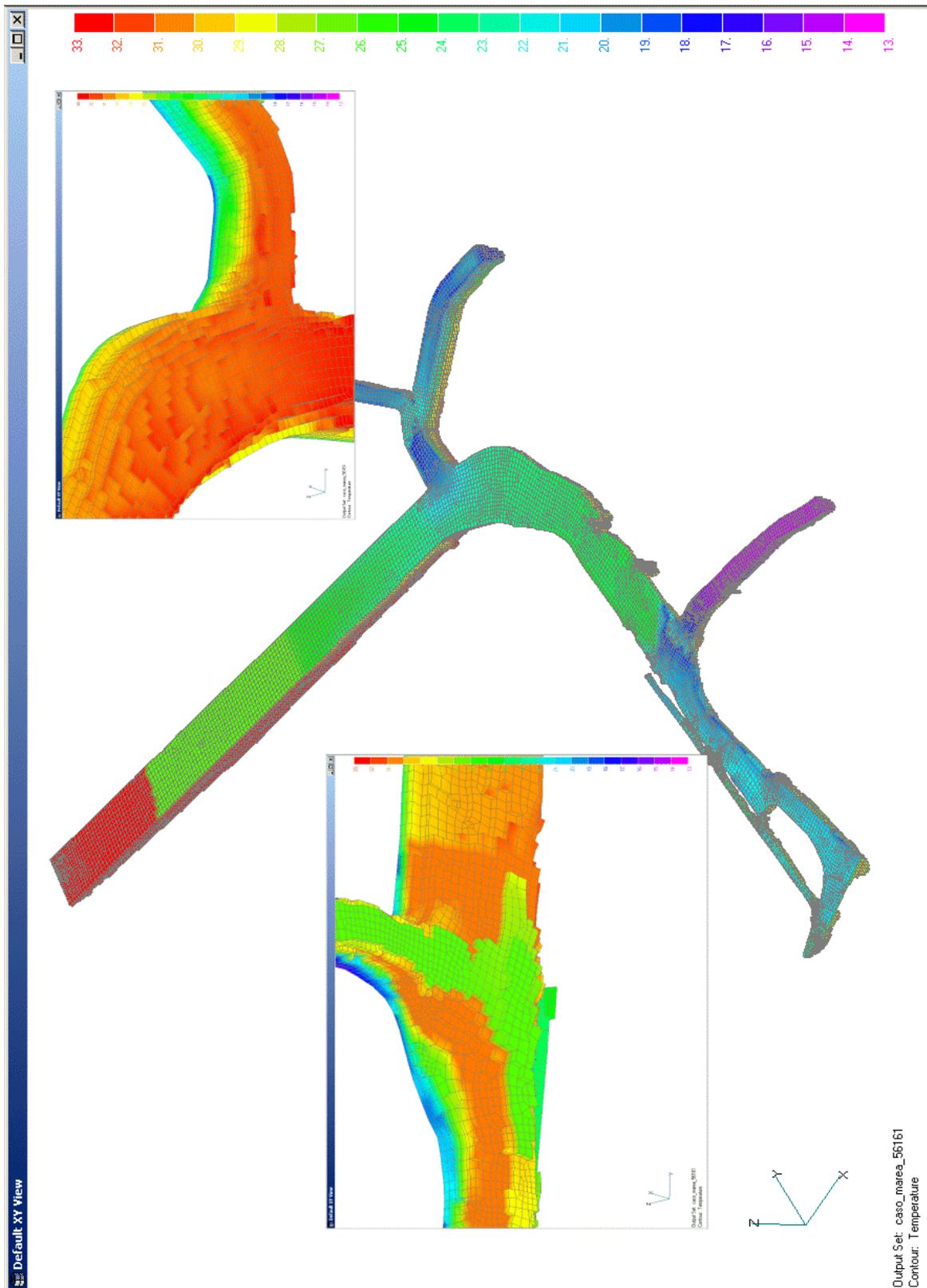


fig. 4.14 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento della temperatura (°C)

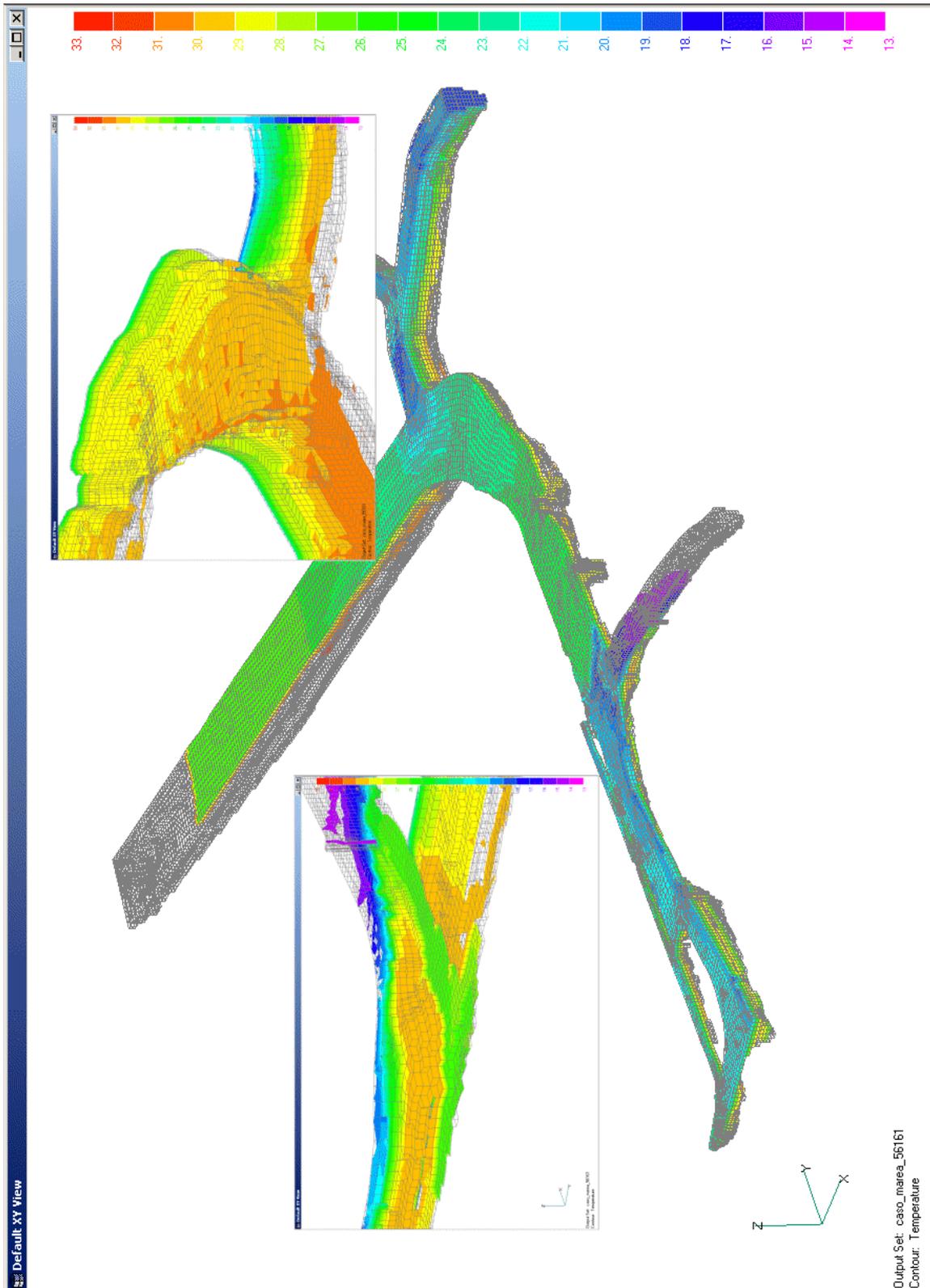


fig. 4.15 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento dei gradienti di temperatura (°C)

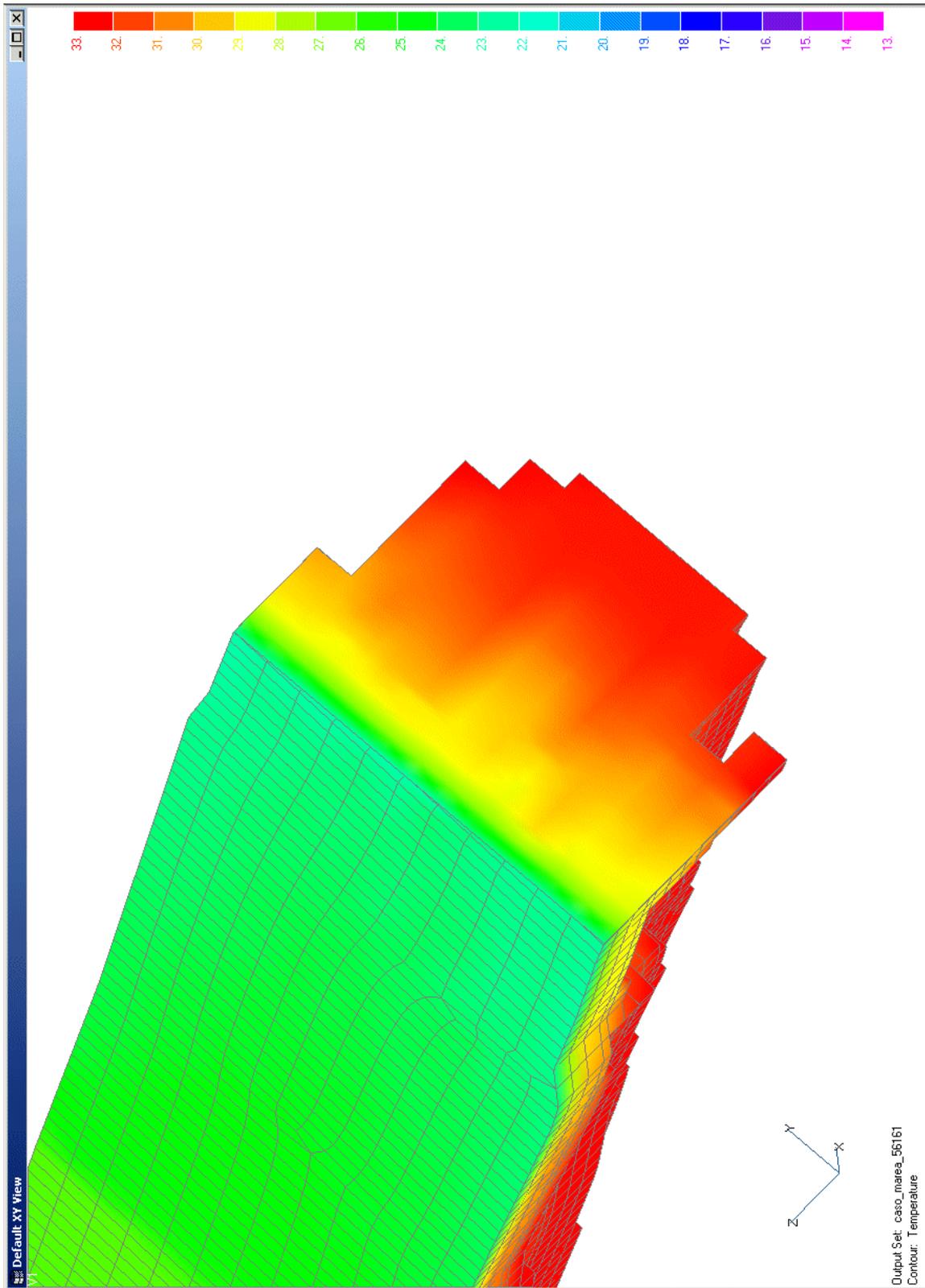


fig. 4.16 – Assetto attuale. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 2 (°C)

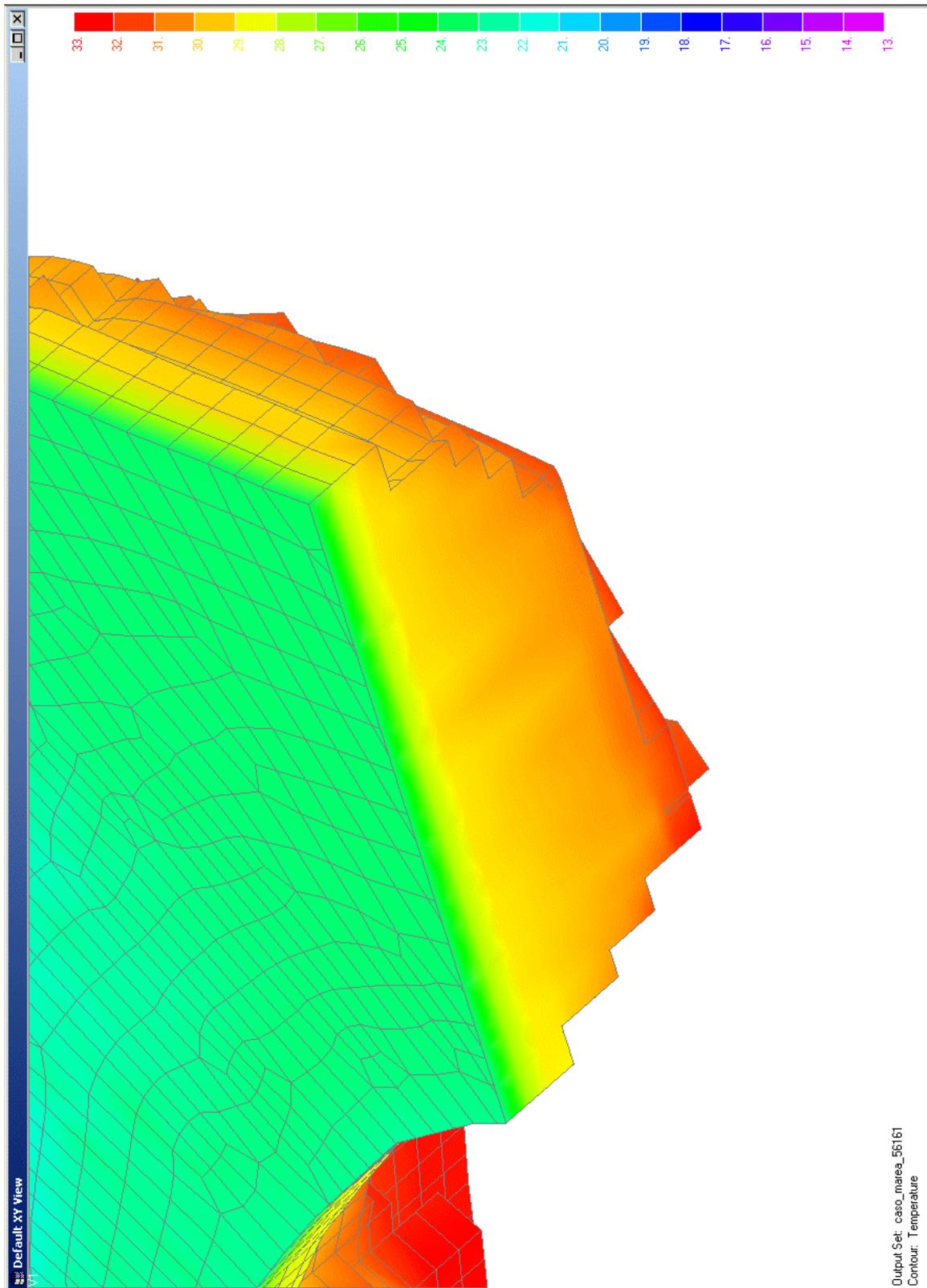


fig. 4.17 – Assetto attuale. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 4 (°C)

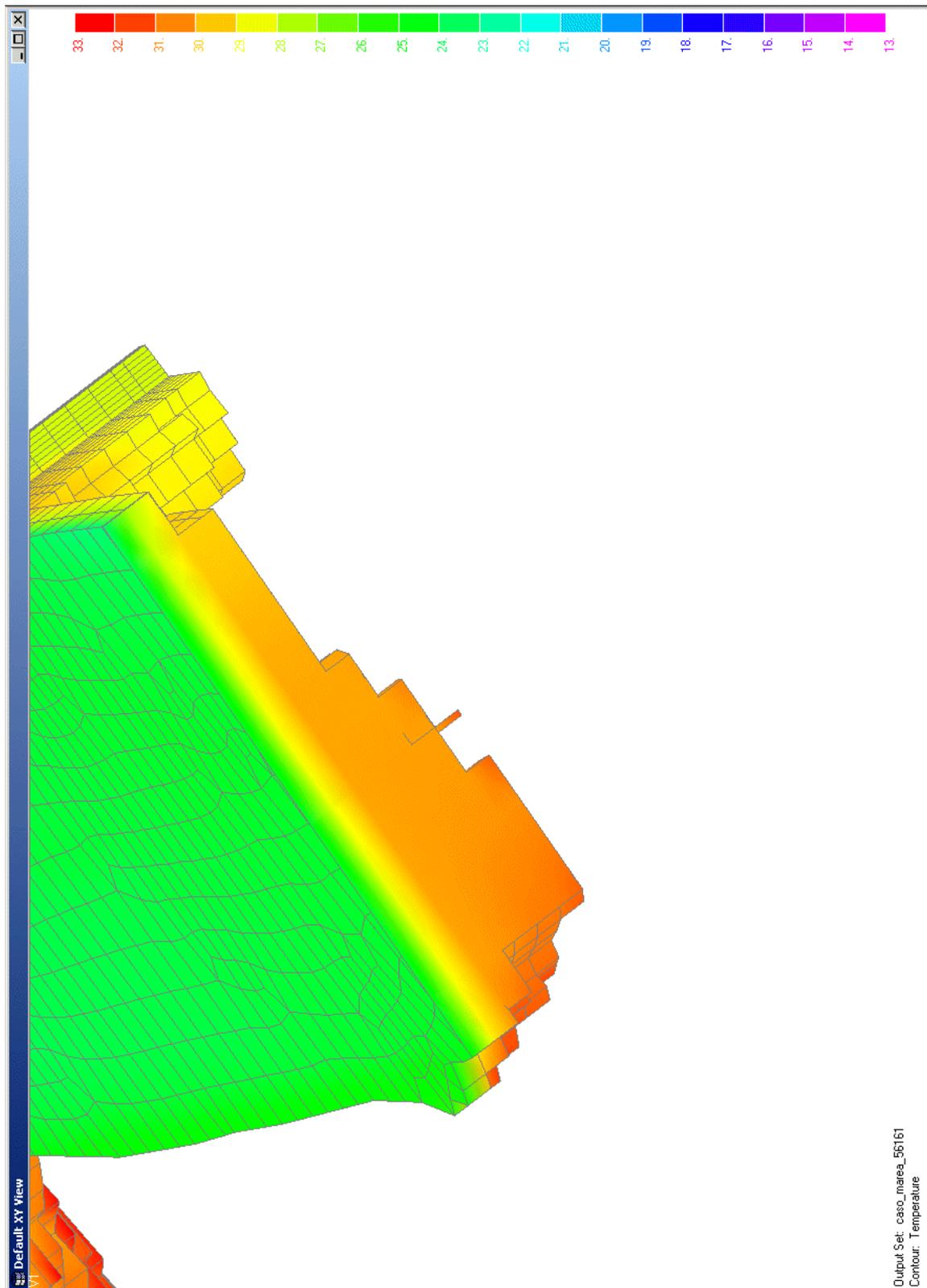


fig. 4.18 – Assetto attuale. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 5 (°C)

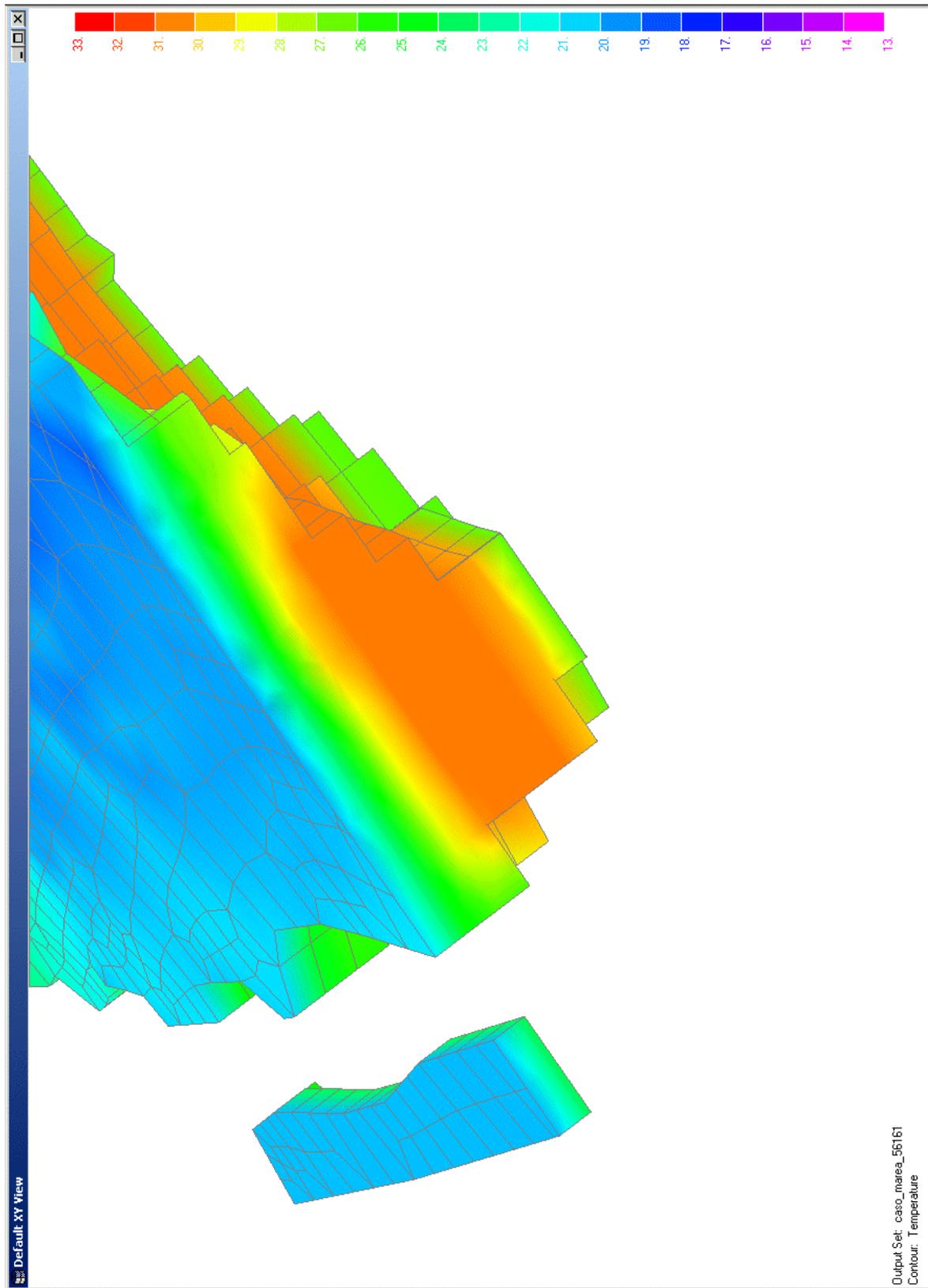


fig. 4.19 – Assetto attuale. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 8 (°C)

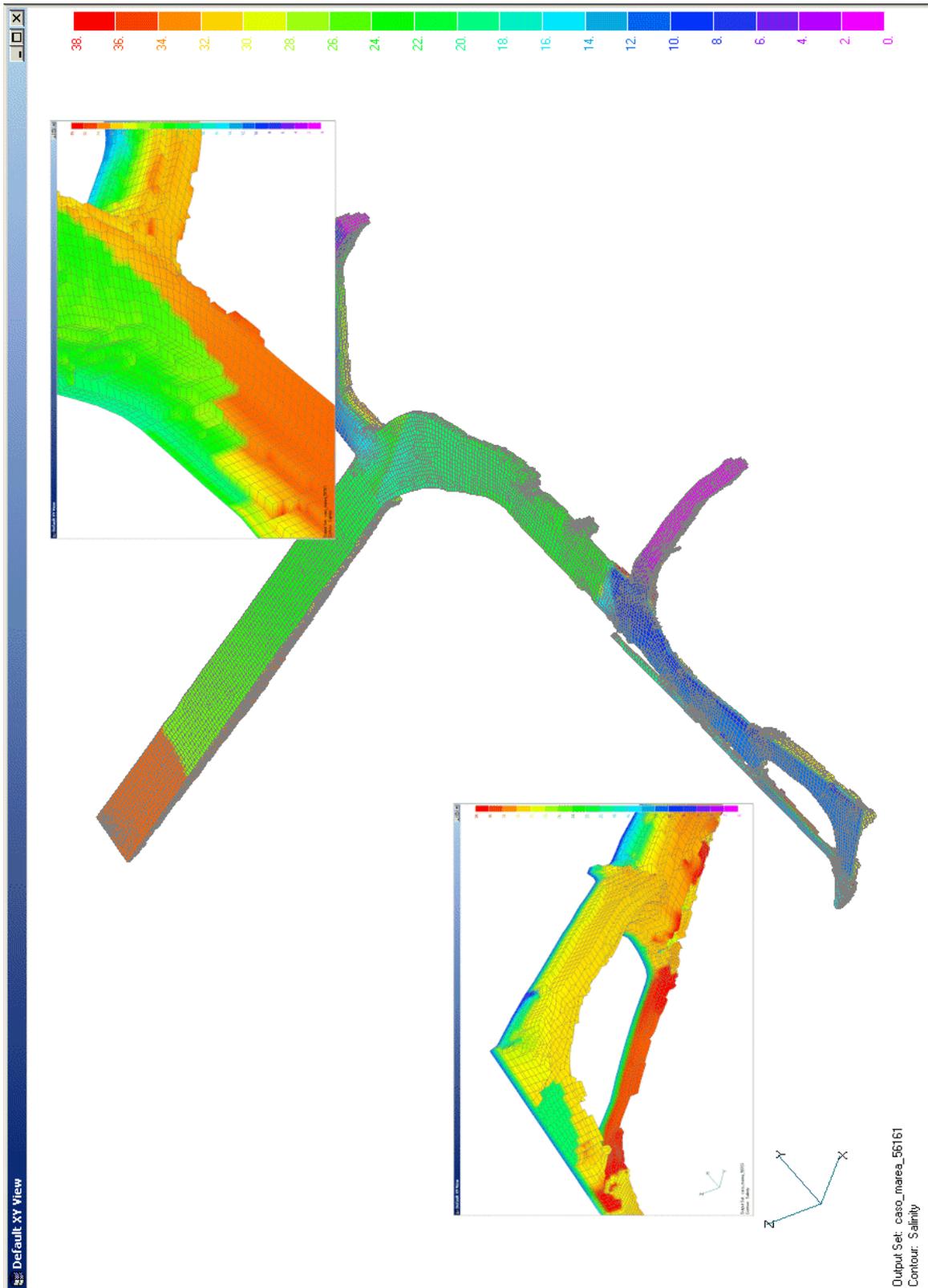


fig. 4.20 – Assetto attuale. Minimo di marea. Andamento della salinità (g/l)

4.2.4 *Simulazione del transitorio di marea: analisi dei risultati nelle condizioni di massimo livello*

La condizioni di esercizio a pieno carico è stata qui simulata ipotizzando di porci nelle tipiche condizioni estive in presenza di massimo livello di marea.

- a) per quanto riguarda l'andamento del campo di moto in termini di velocità totale, nelle figure dalla fig. 4.21 alla fig. 4.24 sono riportate le distribuzioni totale e nelle sezioni di interesse, coincidenti con quelle già considerate per il livello minimo. In particolare, valgono le medesime considerazioni di carattere generale già riportate nell'analisi precedente, con la considerazione aggiuntiva che ora il vettore velocità è in generale orientato verso il mare per tutti gli strati, superficiale e profondo, con valori di velocità inferiori in quest'ultimo essendosi appena verificato il massimo e quindi essendo iniziato il deflusso dell'acqua di mare che aveva risalito il bacino durante la fase di marea crescente precedente.
- b) per quanto riguarda l'andamento del campo di temperatura, nelle figure dalla fig. 4.25 alla fig. 4.30 sono riportate le distribuzioni totale e nelle sezioni di interesse, coincidenti con quelle già considerate per il livello minimo. In particolare, valgono in linea generale le medesime considerazioni già riportate nelle condizioni di minimo di marea, con l'ulteriore considerazione che in questo caso il modello risponde con un aumento della temperatura media dello strato superficiale;
- c) l'andamento di salinità è riportato in fig. 4.31, e mantiene le stesse caratteristiche già discusse per la distribuzione di temperatura.

Infine, nelle condizioni di pieno carico e massimo livello di marea qui considerate, si constata la presenza nella sezione di foce di uno strato caldo e salato, compreso tra uno strato superficiale freddo ed uno strato salato freddo profondo, avente temperatura dell'ordine di 29 °C, superiore quindi di circa 2.5 °C alla temperatura considerata per l'acqua di mare, come effetto della dispersione termica delle acque di raffreddamento della centrale. Il fatto che la temperatura di questo strato originato dalla dispersione termica sia inferiore di 1 °C rispetto alle condizioni di minimo di marea può essere attribuito al fatto che comunque la sezione calda alla foce è ora maggiore per l'aumentato livello, ed inoltre lo strato freddo, lo strato caldo salato di scarico e lo strato inferiore di acqua di mare scorrono nello stesso senso favorendo la diffusione del pennacchio.

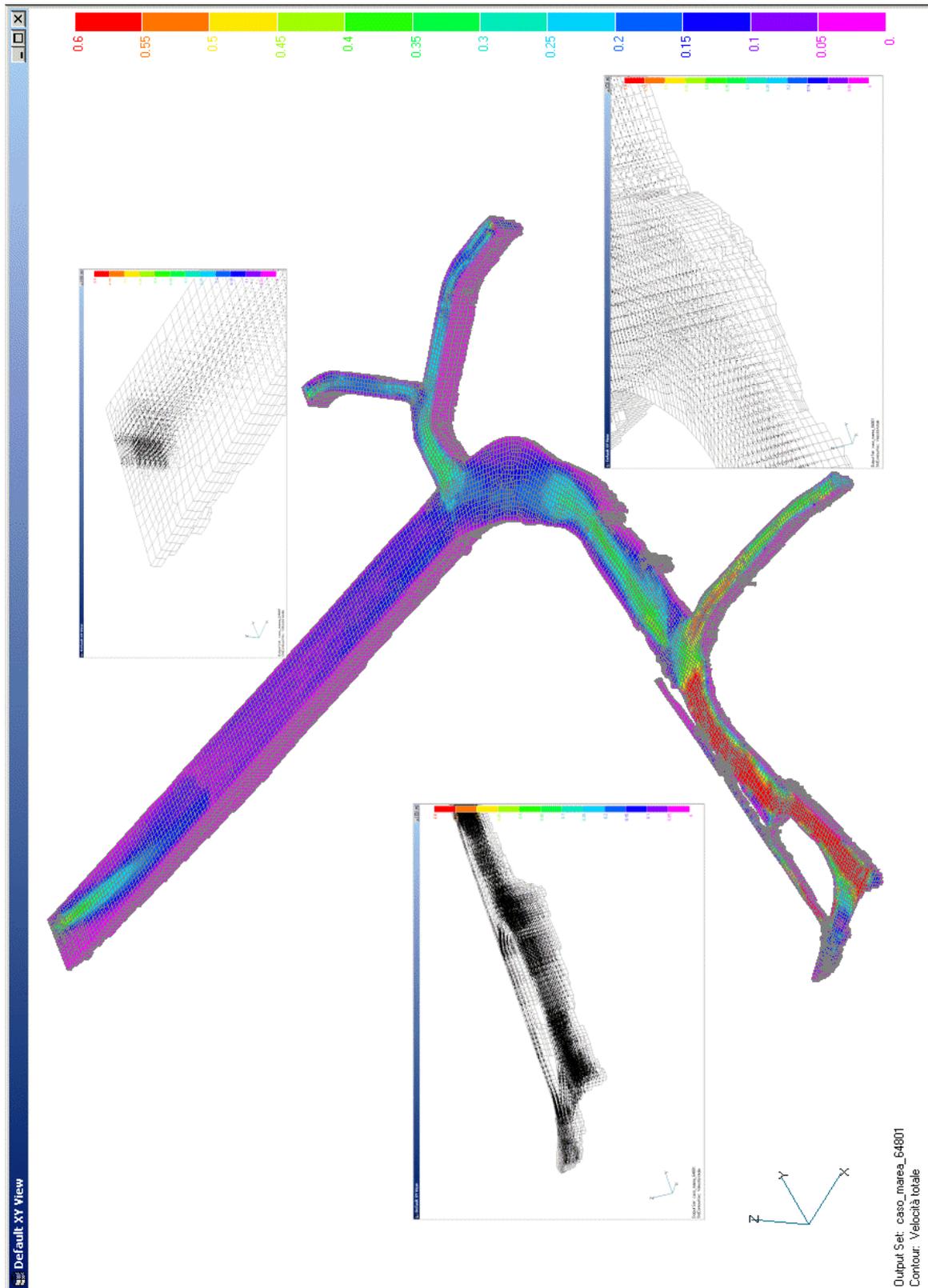


fig. 4.21 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento della velocità (m/s)

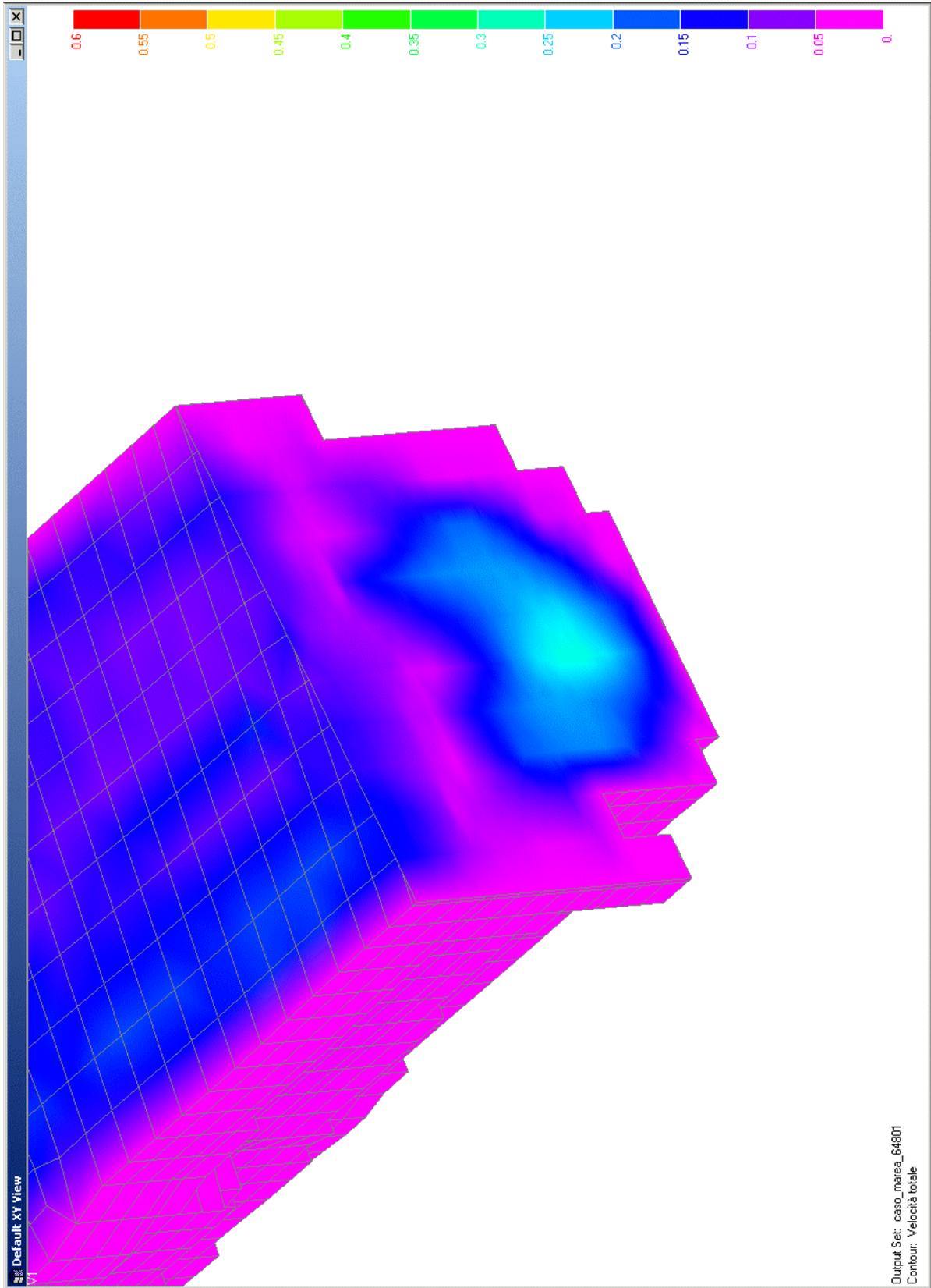


fig. 4.22 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 2 (m/s)

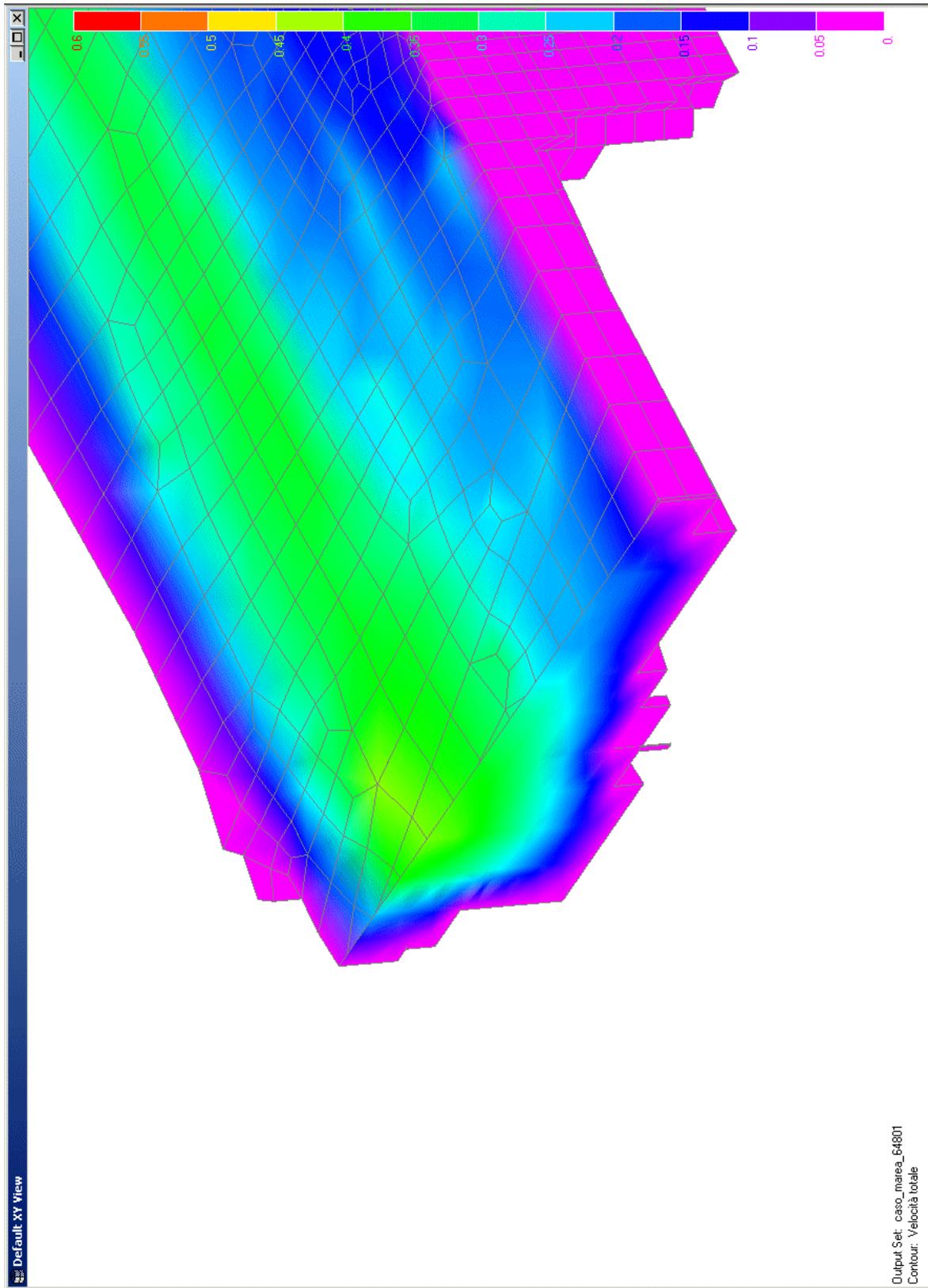


fig. 4.23 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 5 (m/s)

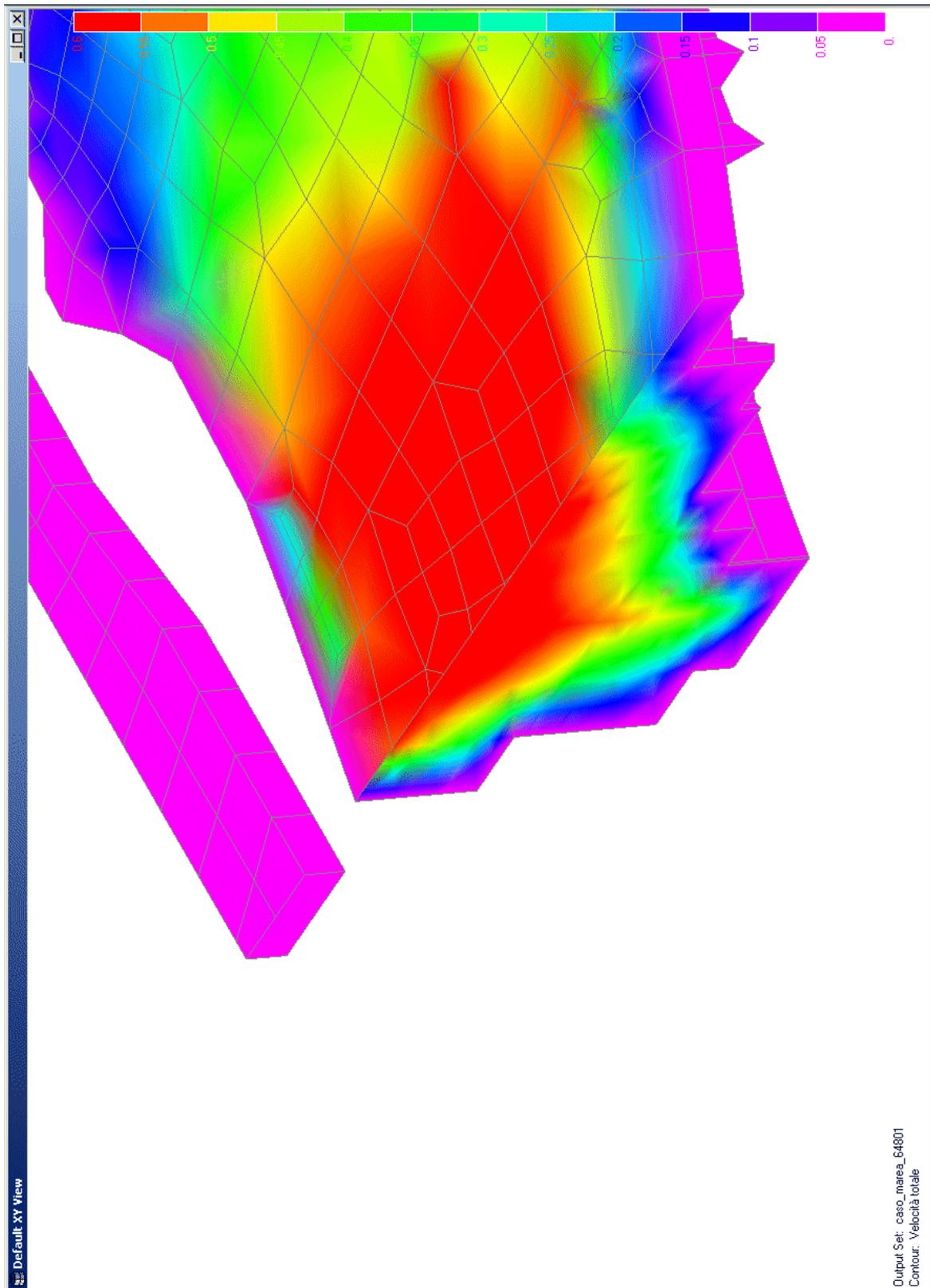


fig. 4.24 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 8 (m/s)

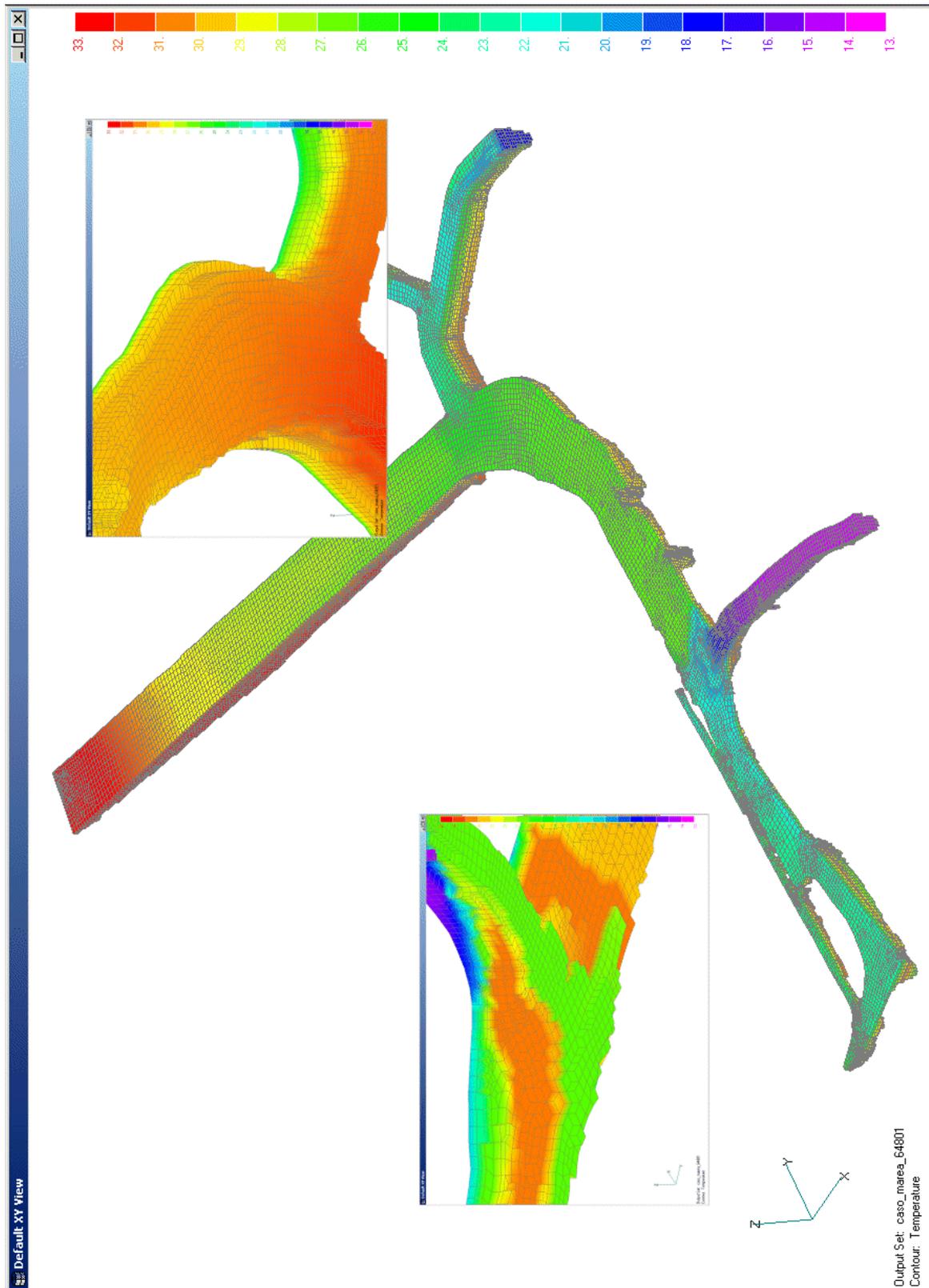


fig. 4.25 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento della temperatura (°C)

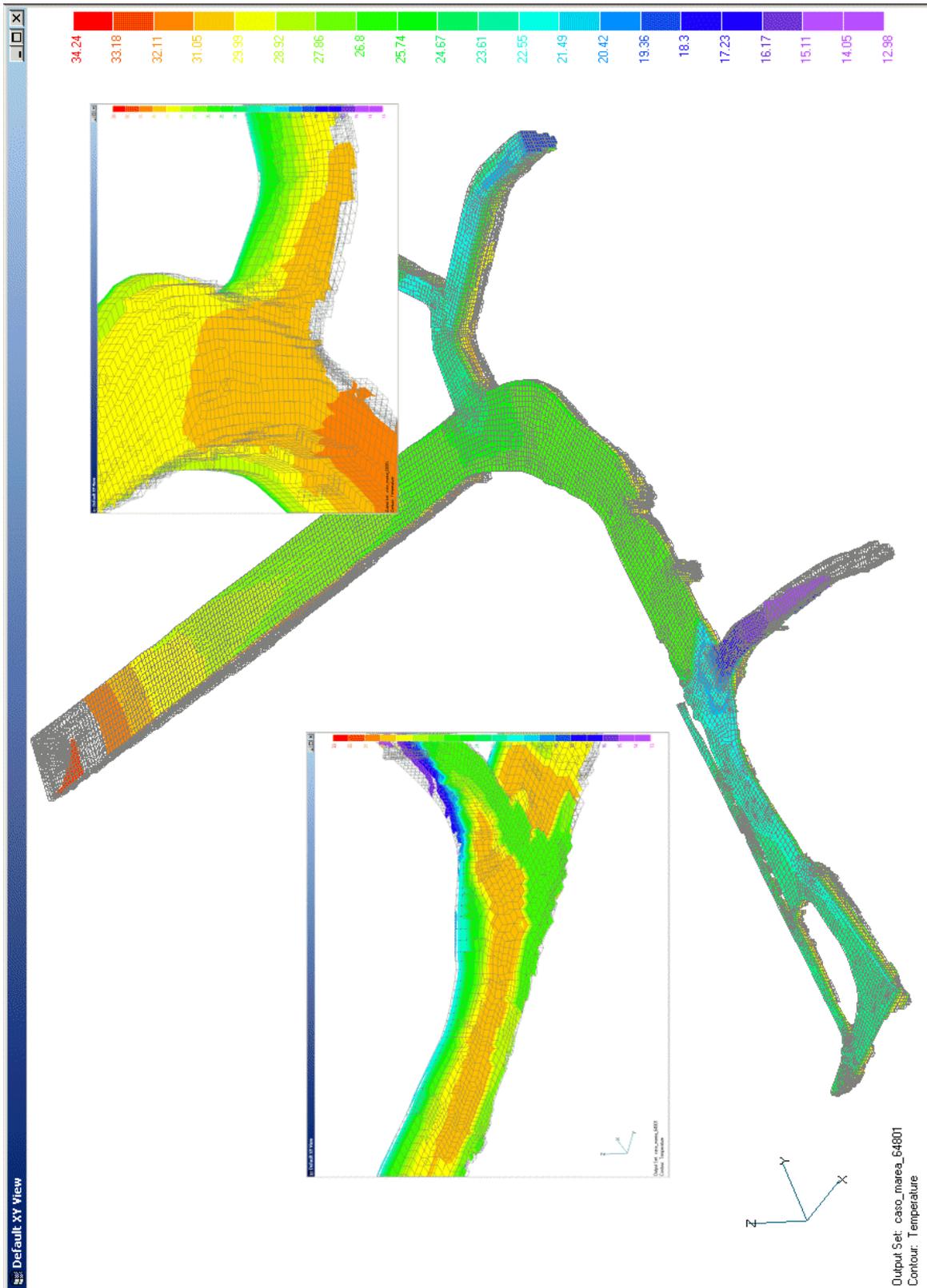


fig. 4.26 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento dei gradienti di temperatura (°C)

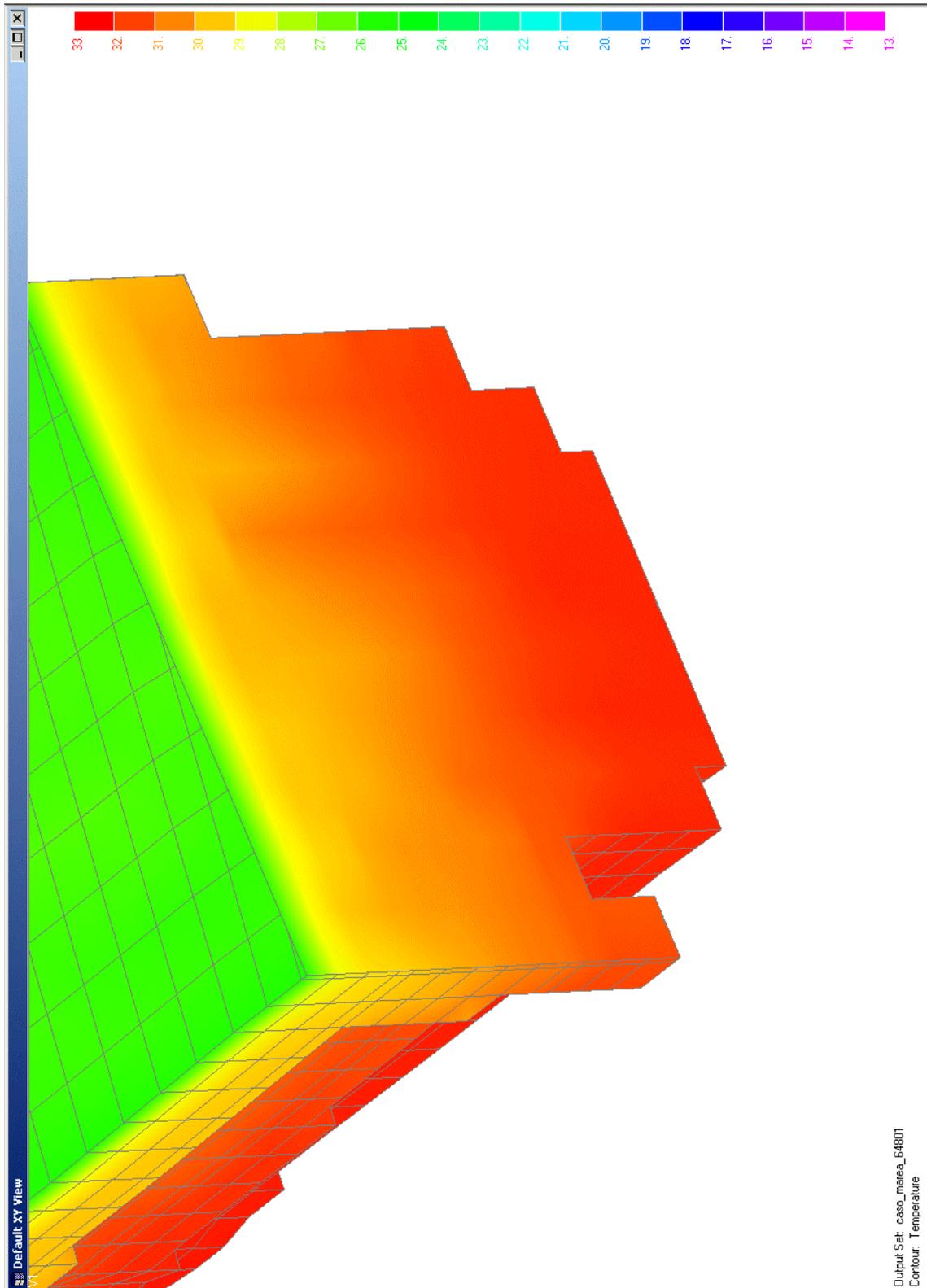


fig. 4.27 – Assetto attuale. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 2 (°C)

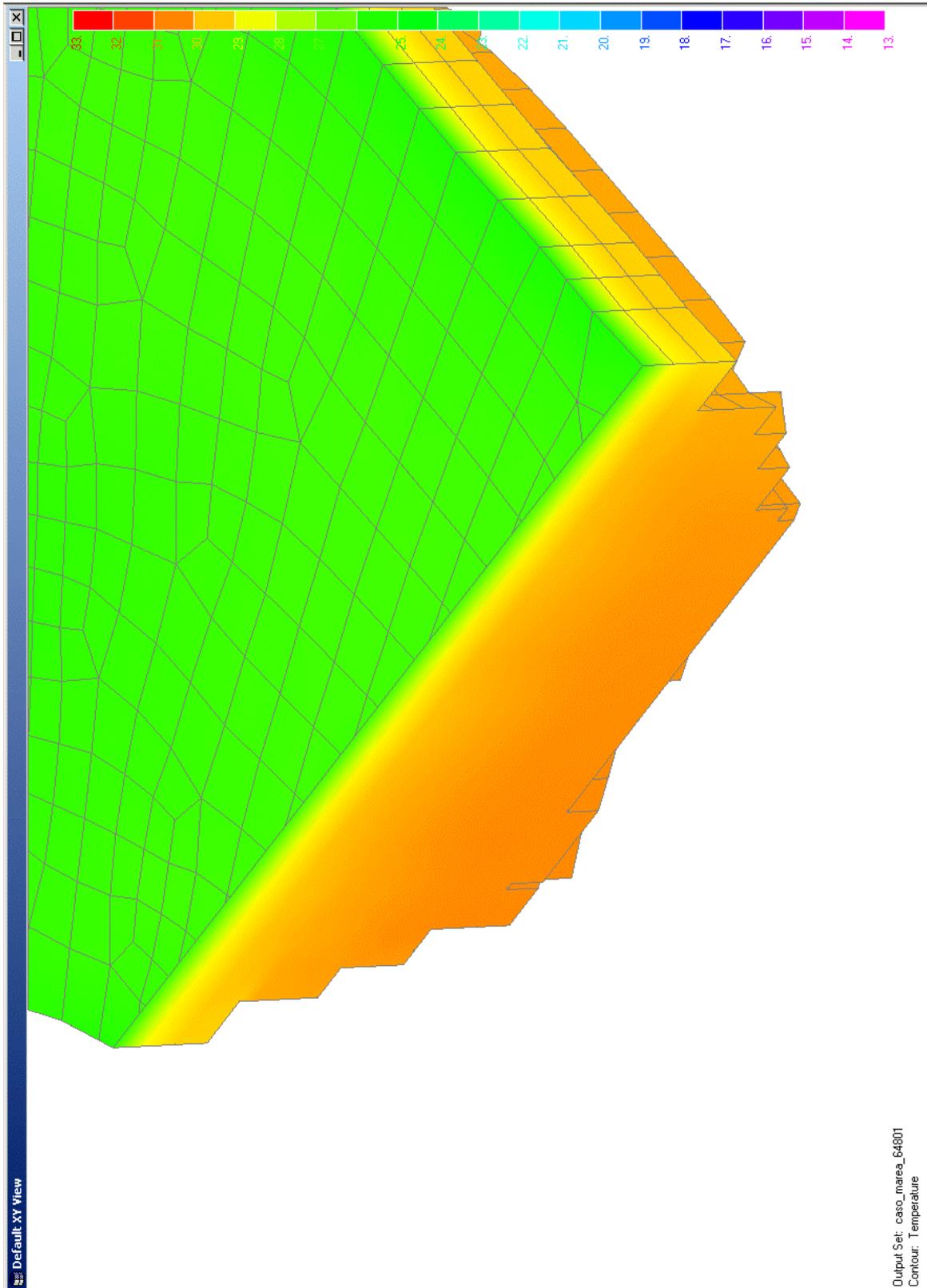


fig. 4.28 – Assetto attuale. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 4 (°C)

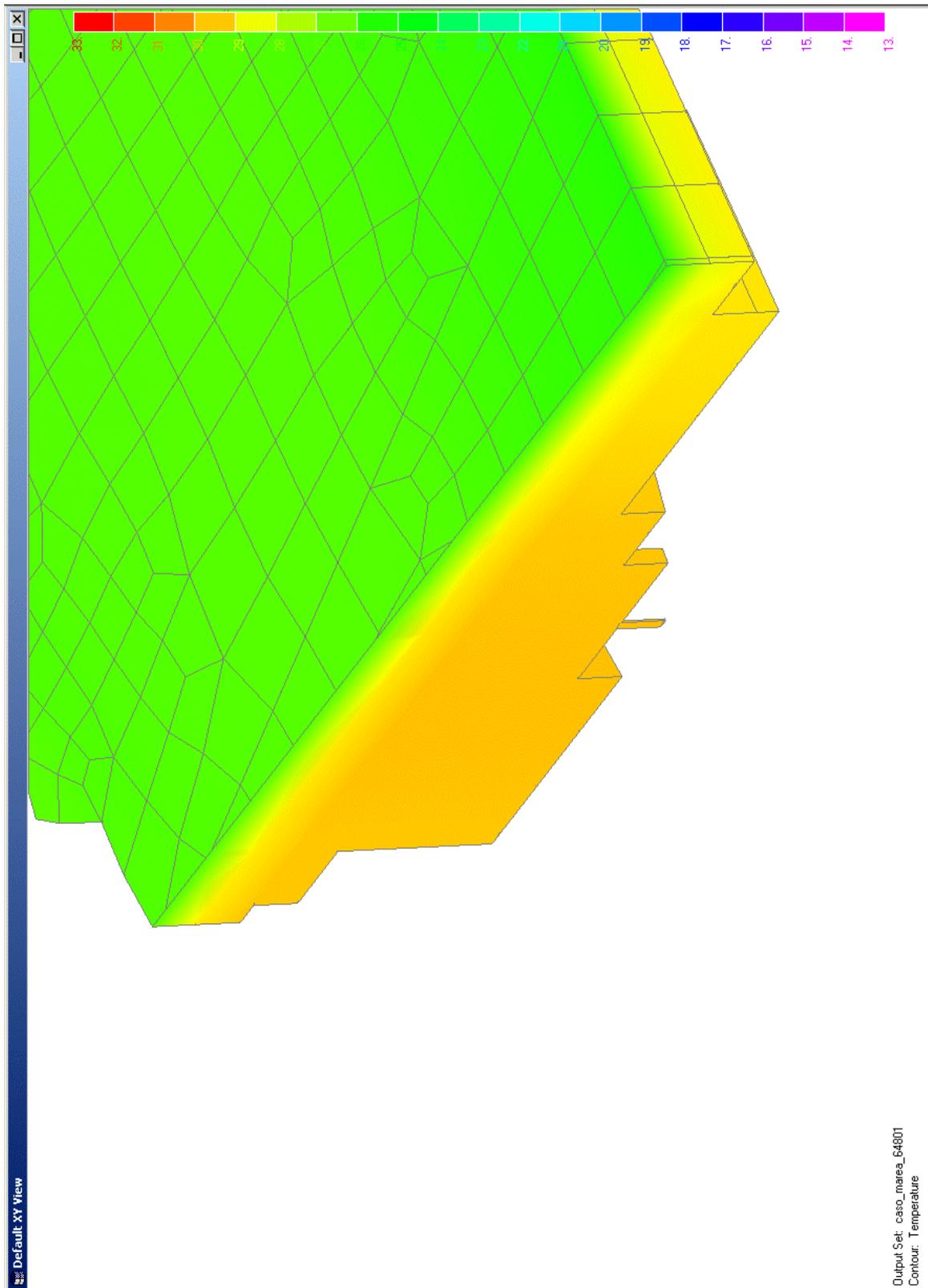


fig. 4.29 – Assetto attuale. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 5 (°C)

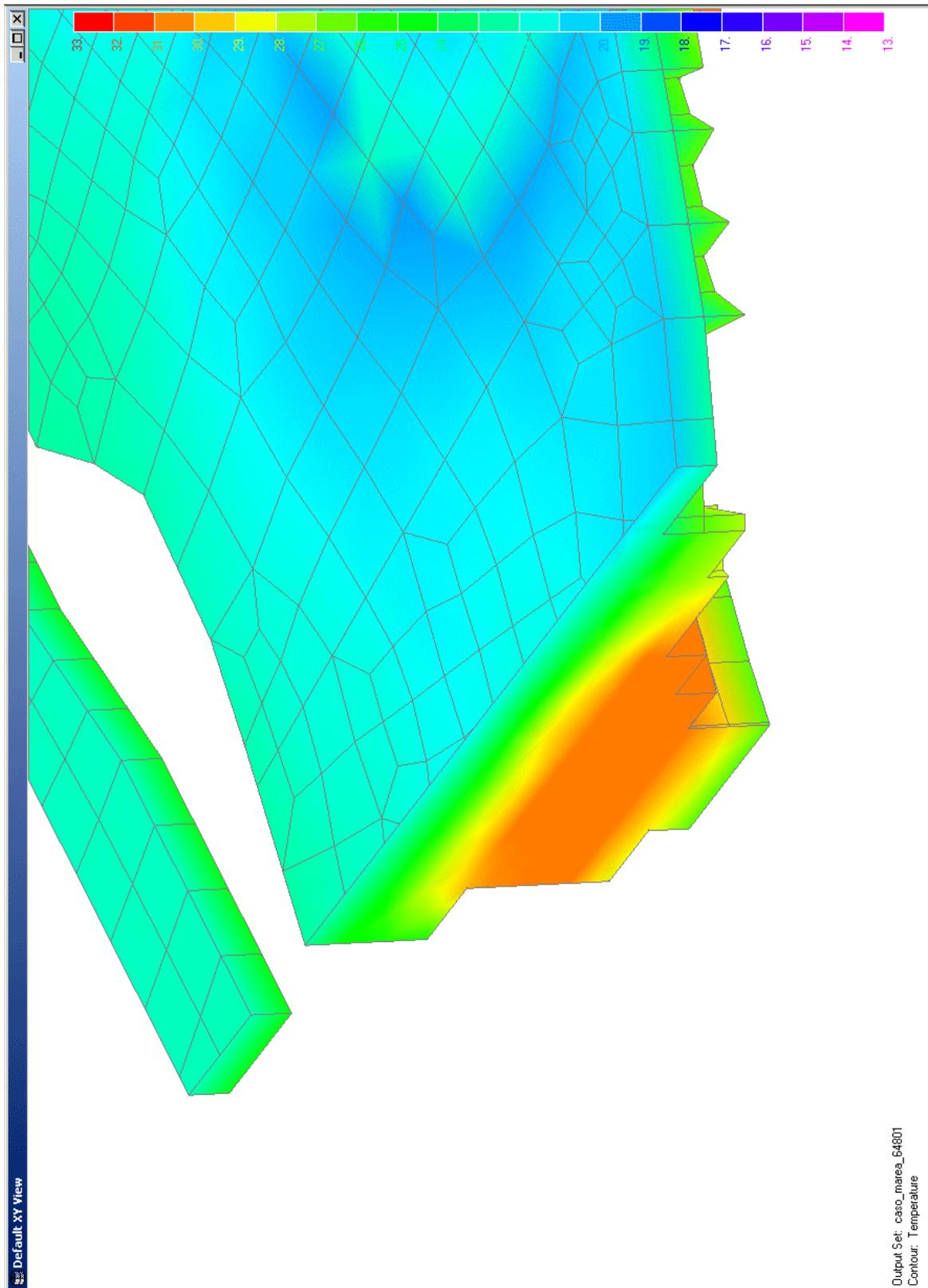


fig. 4.30 – Assetto attuale. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 8 (°C)

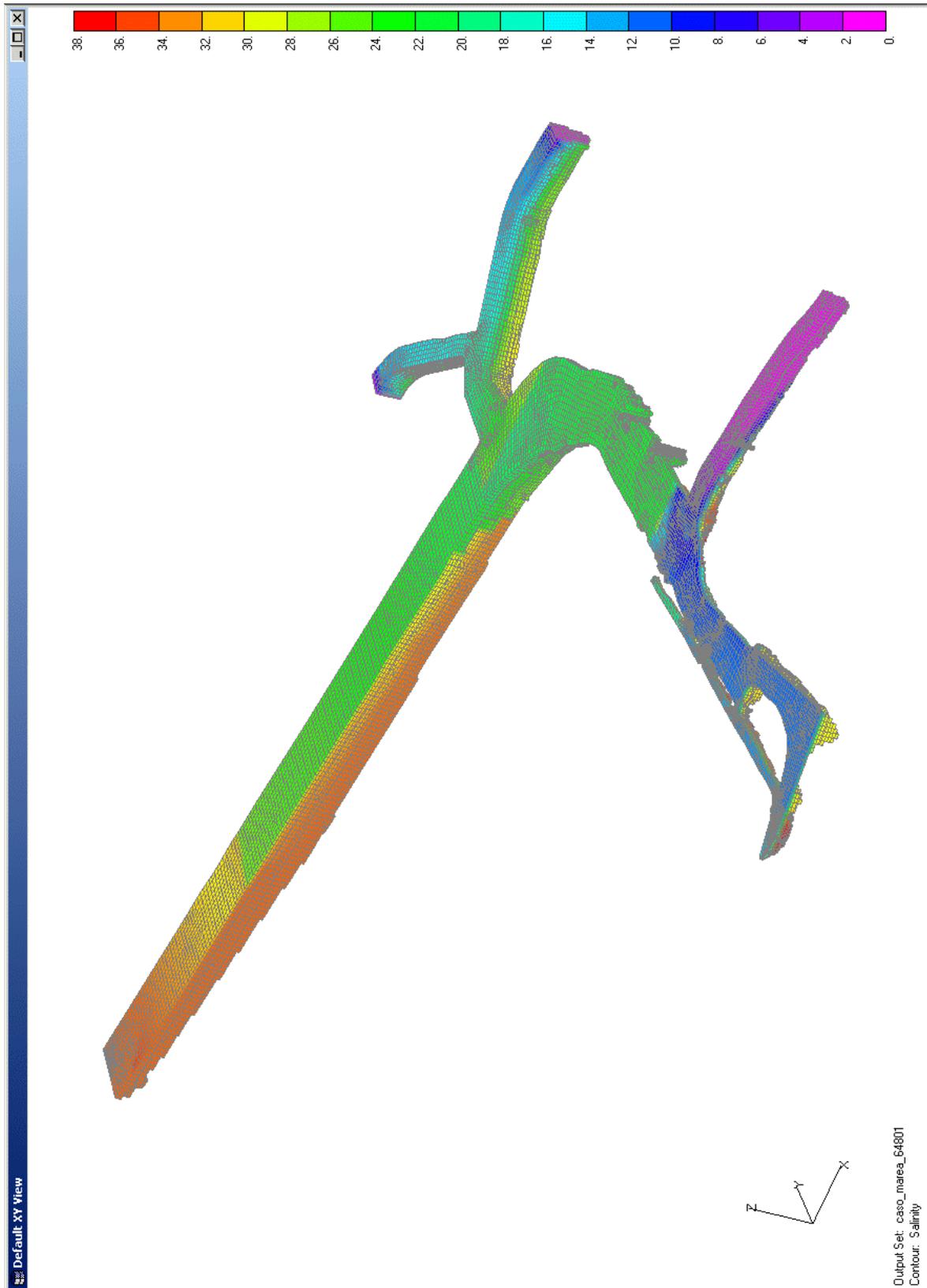


fig. 4.31 – Assetto attuale. Massimo di marea. Andamento della salinità (g/l)

4.3 Analisi della dispersione termica nella configurazione futura a cicli combinati

4.3.1 Considerazioni generali

Questa sezione è volta all'analisi dell'impatto della trasformazione a cicli combinati dell'impianto sulle condizioni di dispersione termica, per cui sono state eseguite le medesime simulazioni descritte al paragrafo precedente per l'assetto attuale della centrale, adeguando le sole condizioni di scarico in termini di portata e di incremento termico massimo allo scarico.

4.3.2 Stato stazionario di inizializzazione: analisi dei risultati

In primo luogo è stato analizzato lo stato di equilibrio stazionario propedeutico alla simulazione del transitorio di marea, nelle condizioni di esercizio a pieno carico; esso è stato raggiunto dopo un periodo di tempo simulato pari a tre giorni (51840 passi di calcolo di 5 s ciascuno), partendo da uno stato iniziale di acqua fredda e dolce ovunque, in stato di quiete, ed imponendo le corrispondenti condizioni per l'assetto a ciclo combinato di immissione di acqua calda e salata alla sezione di scarico della centrale, di acqua calda e parzialmente salata alla sezione di scarico della cartiera, di acqua dolce e fredda alle sezioni aperte di ingresso per i canali Tavoloni e Moschenizze, nonché alla sezione di ingresso del fiume Timavo. Le condizioni di temperatura e di portata imposte sono quelle indicate in tab. 3.1 per l'assetto futuro dell'impianto.

L'andamento generale del flusso idrodinamico e della distribuzione di temperatura e salinità che ne deriva mantiene sostanzialmente le stesse caratteristiche evidenziate durante l'analisi nell'assetto attuale di impianto, con però alcune notevoli eccezioni:

- a) L'andamento del campo di moto in termini di velocità totale, riportato in fig. 4.32, mostra un andamento simile nelle caratteristiche a quello risultante dalla precedente simulazione stazionaria, ma con valori di velocità media inferiori di circa il 25% nel canale Lisert, che a sua volta condiziona il movimento delle masse d'acqua nel tratto superiore del Locavaz, fino alla confluenza con il Timavo, dove la componente di velocità indotta da quest'ultimo diventa comunque predominante. Questo andamento è confermato dall'analisi delle distribuzioni vettoriali del campo di moto, di cui in fig. 4.33 sono mostrati alcuni dettagli significativi;
- b) la simulazione qui discussa è stata eseguita in condizioni stazionarie senza l'applicazione della marea, per cui il livello alla sezione di foce è pari al livello di medio mare. La fig. 4.54 mostra l'andamento della elevazione superficiale dell'intero dominio conseguente allo stato di equilibrio idrodinamico raggiunto; il livello idrico si innalza progressivamente dalla foce verso le sorgenti del Moschenizze, da 0 m s.l.m. a circa 0.10 m s.l.m., con un valore a monte che è quindi di un paio di centimetri inferiore, dato il minore apporto di acqua proveniente dallo scarico;
- c) è stato poi analizzato l'andamento della distribuzione di temperatura, riportato in fig. 4.35 per l'intero dominio. Risulta immediatamente evidente l'effetto della minore quantità di calore scaricata dalla centrale nell'assetto a cicli combinati, in particolare nel tratto del Locavaz dove si ha ora un pennacchio termico che interessa di fatto la semisezione verso la sponda destra. L'incontro con le acque molto fredde e veloci del Timavo determina ancora un brusco cambiamento nella distribuzione di temperatura,

con il pennacchio caldo che tende a comprimersi nella semisezione di destra dell'alveo, ma con un aumento del miscelamento che porta alla foce, come mostrato in dettaglio in fig. 4.36, temperature che vanno dai 20 °C ai 28 °C, a seconda della verticale scelta;

- d) se si esamina l'andamento dei gradienti di temperatura di fig. 4.37, si nota immediatamente l'assenza di gradienti sensibili nel canale Lisert, completamente riscaldato, mentre diminuisce l'efficienza del miscelamento nel tratto del Locavaz, con gradienti più deboli. Analogo comportamento si verifica, seppur in misura meno marcata, dato comunque il sensibile apporto di acqua fredda del Timavo, a valle della confluenza del Locavaz col Timavo stesso;
- e) anche la salinità, come si vede nelle figure dalla fig. 4.38 alla fig. 4.40, ha un andamento simile a quello discusso per la temperatura, con un incremento della concentrazione media in tutto il Locavaz, fino alla foce, con valori sempre compresi tra 8 e 33 g/l, a seconda della verticale considerata.

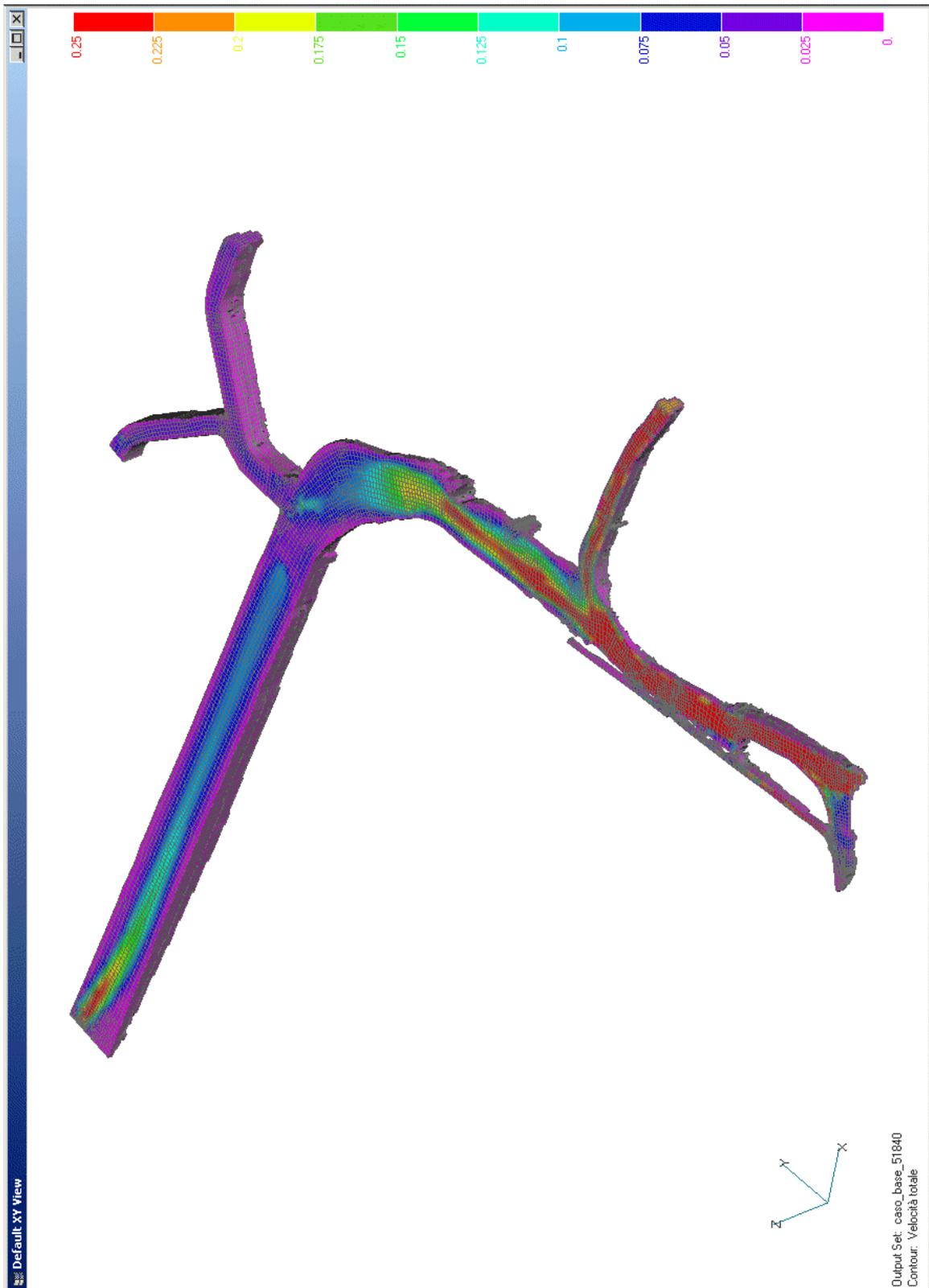


fig. 4.32 – Assetto a cicli combinati.Stato stazionario a pieno carico. Andamento della velocità (m/s)

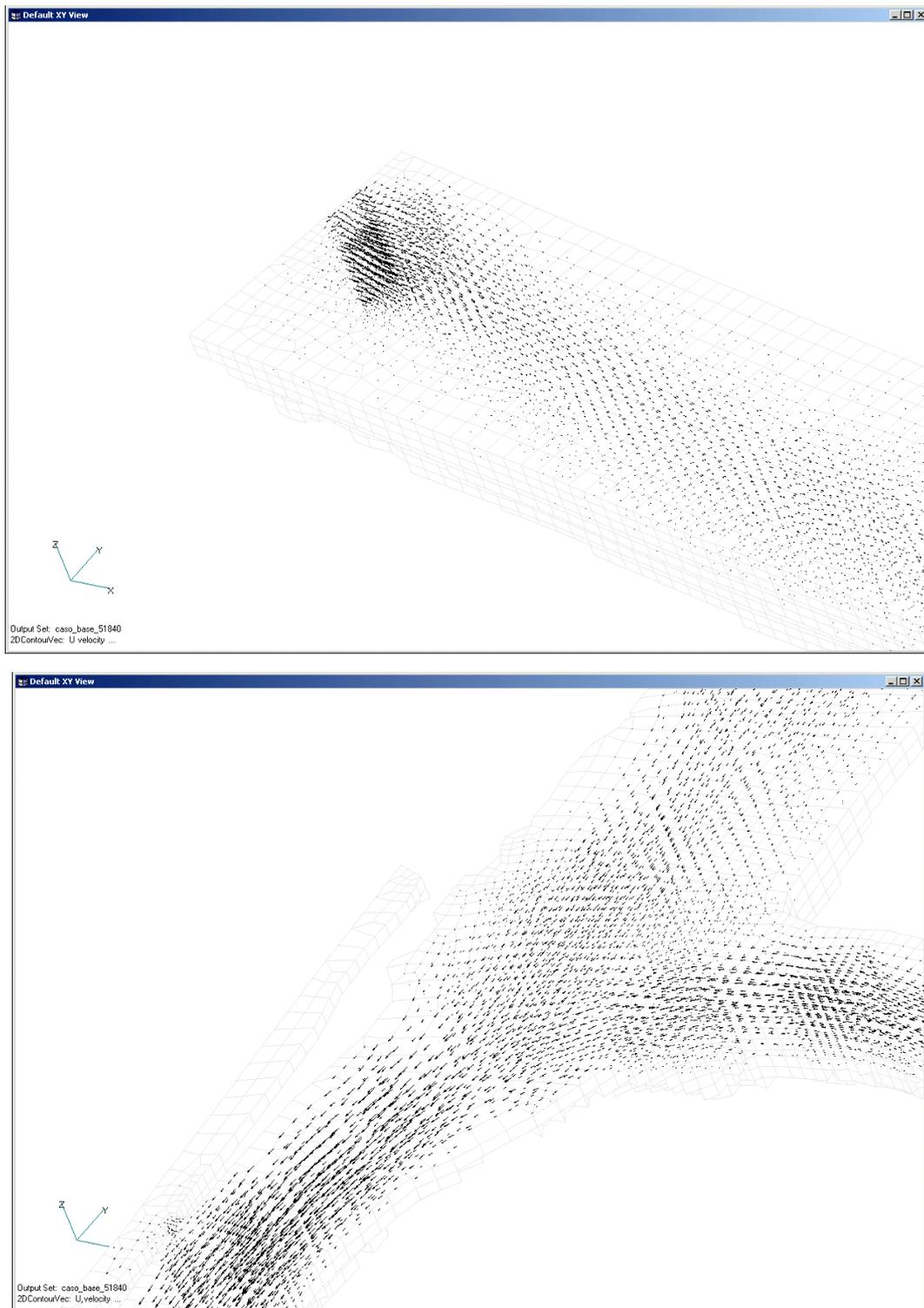


fig. 4.33 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Particolari del campo di moto nella zona dello scarico della Centrale e nella zona di confluenza con il fiume Timavo

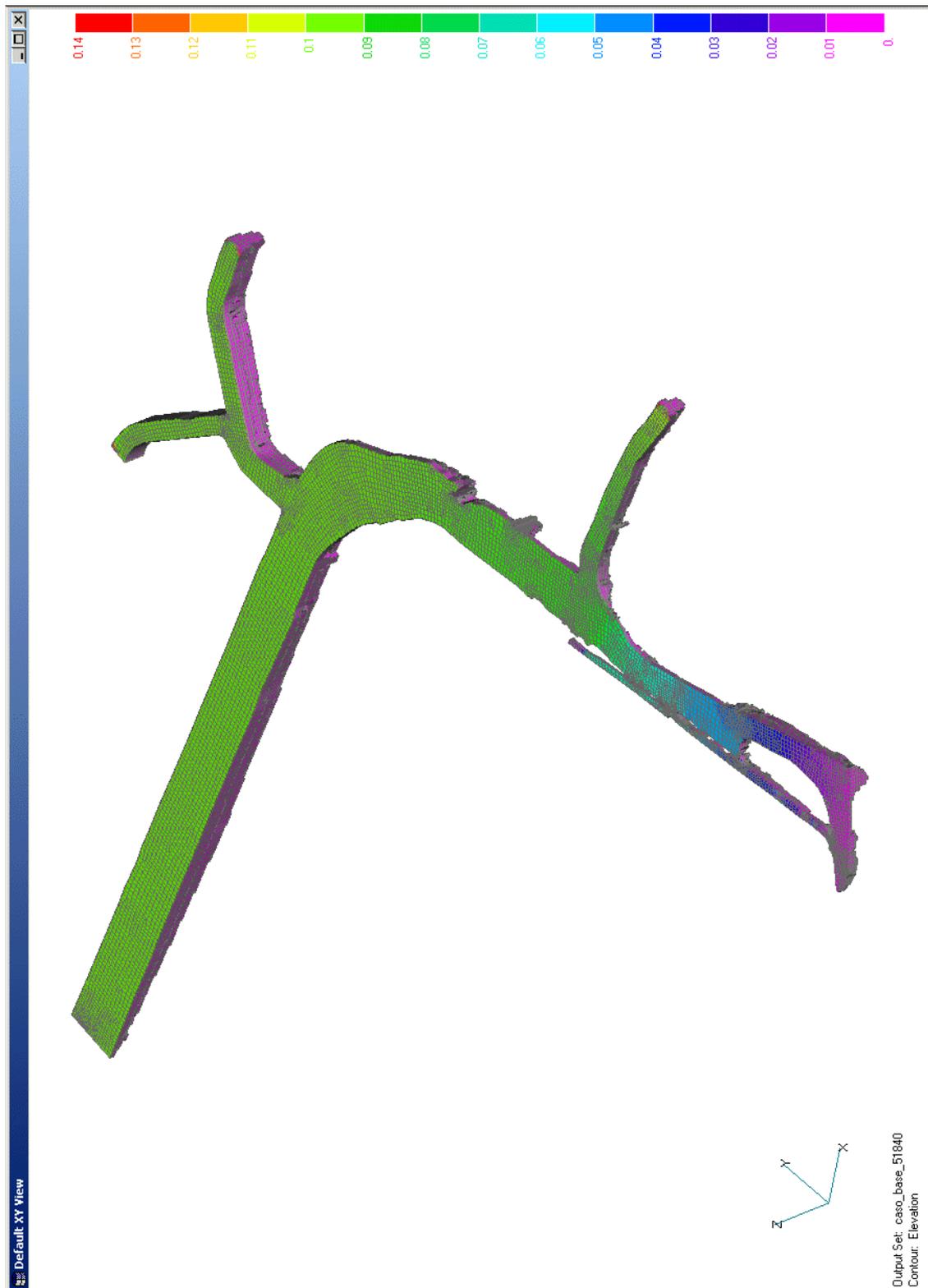


fig. 4.34 - Assetto a cicli combinati.Stato stazionario a pieno carico. Andamento della elevazione rispetto al medio mare (m)

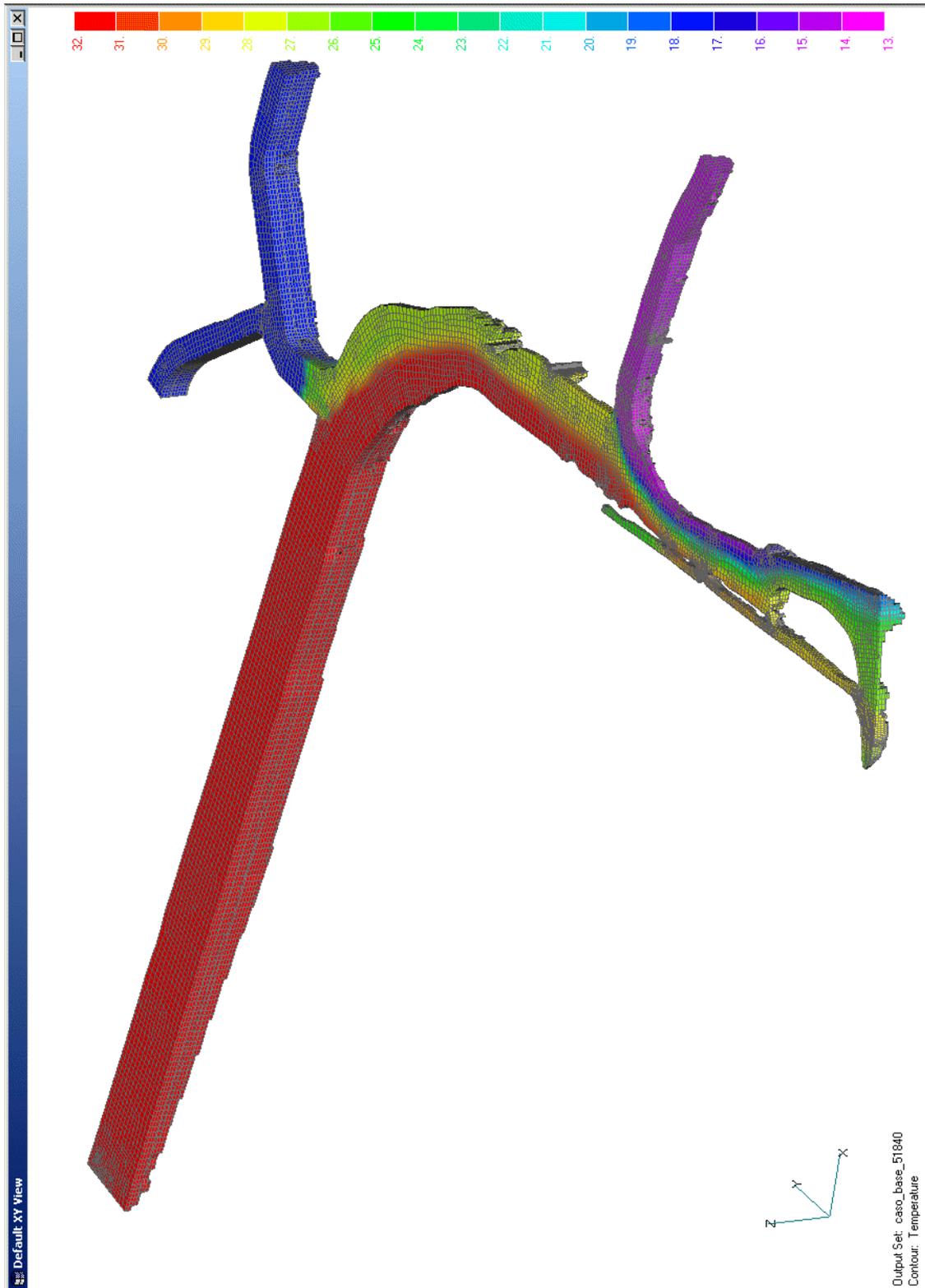


fig. 4.35 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della temperatura (°C)

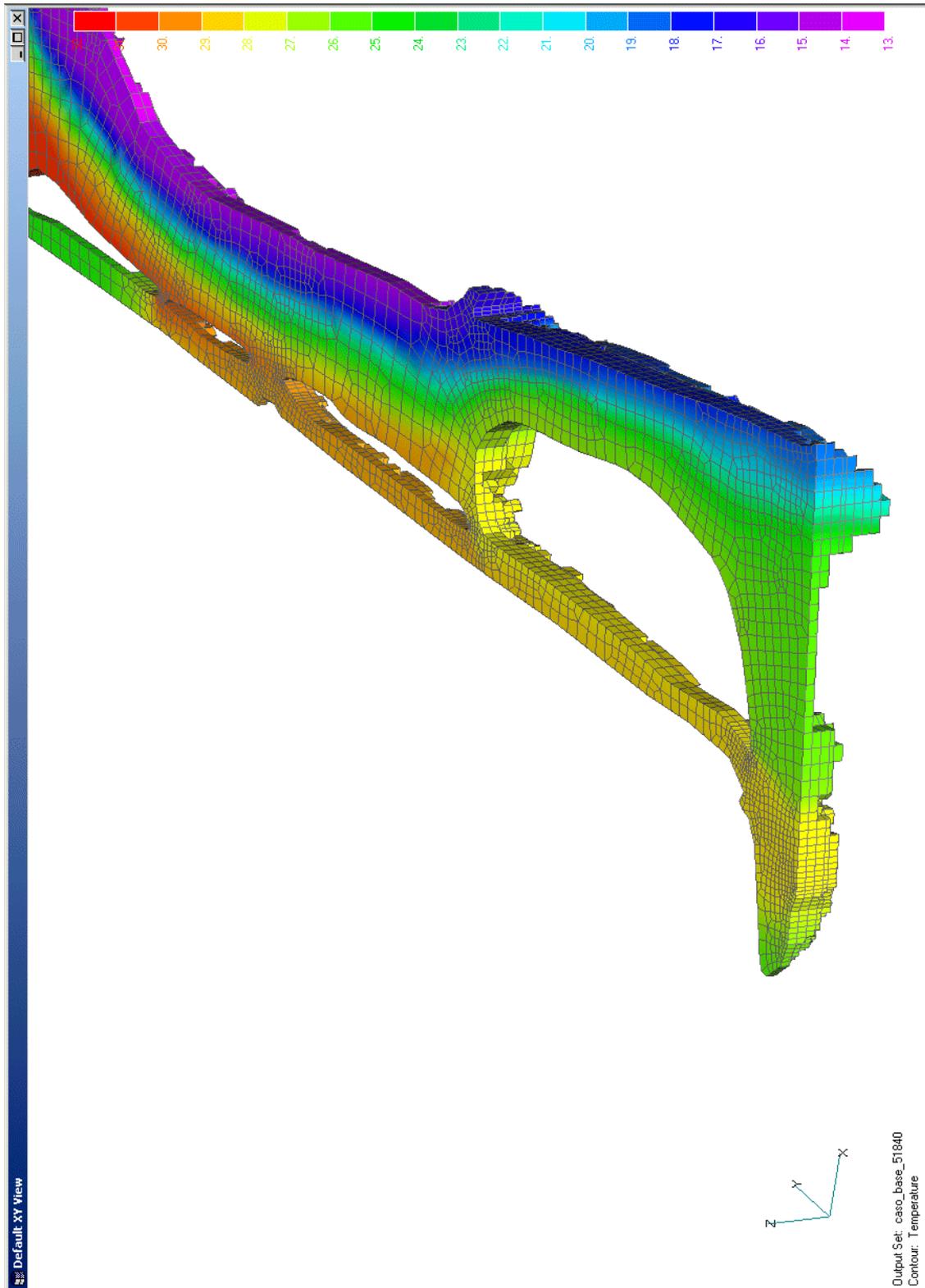


fig. 4.36 - Assetto a cicli combinati.Stato stazionario a pieno carico. Andamento della temperatura (°C). Particolare della zona della foce

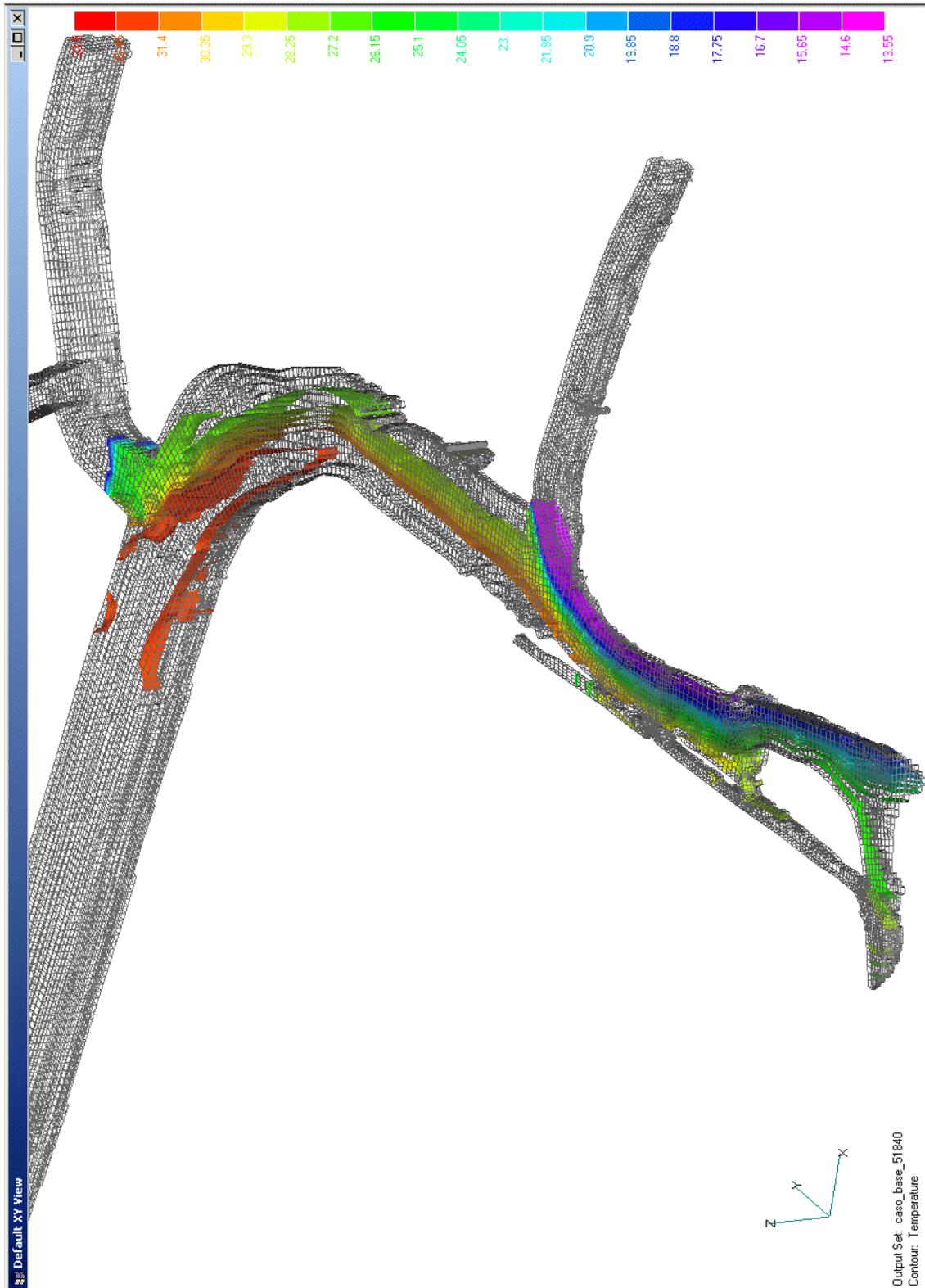


fig. 4.37 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento dei gradienti di temperatura (°C)

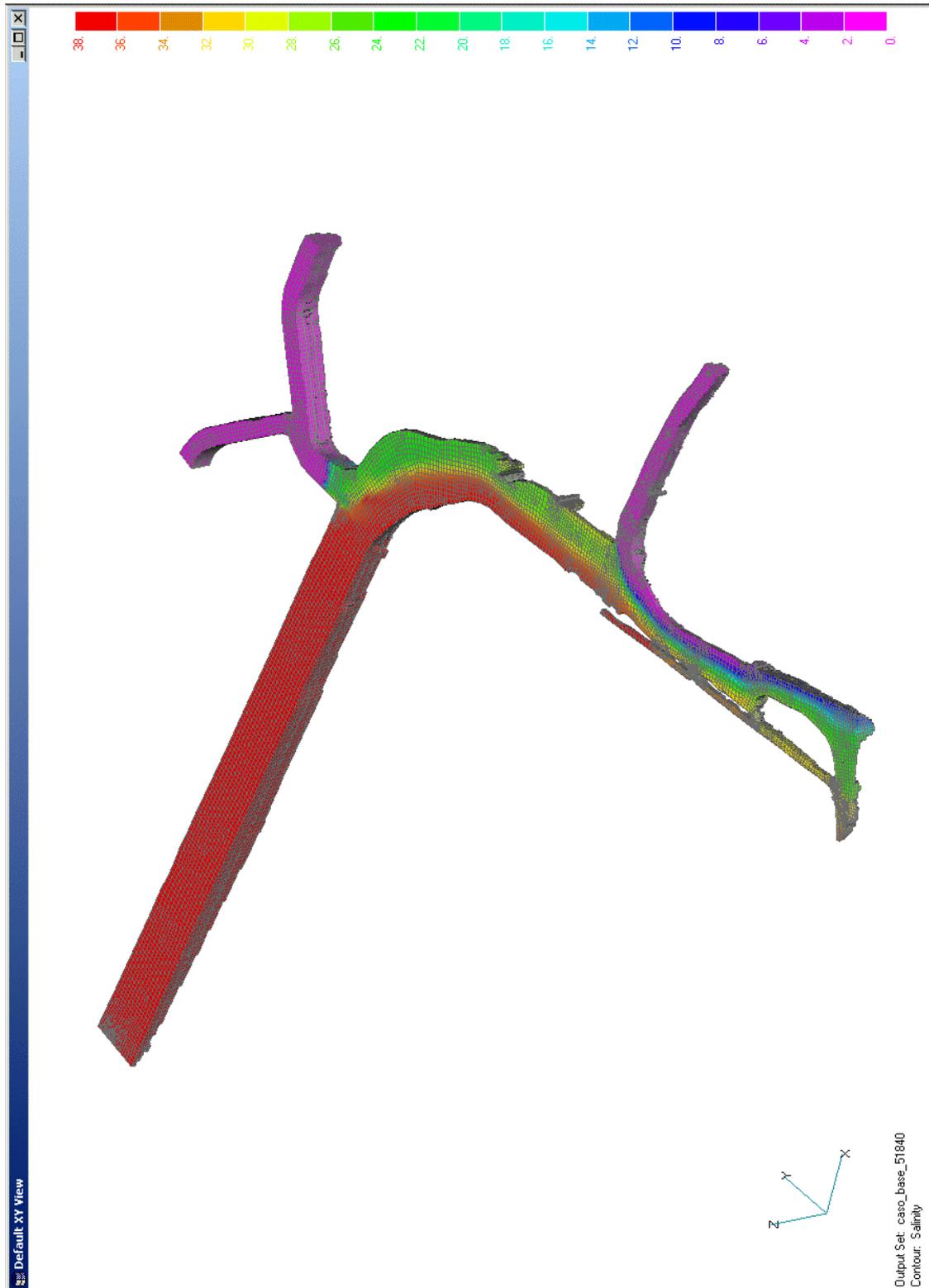


fig. 4.38 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della salinità (g/l)

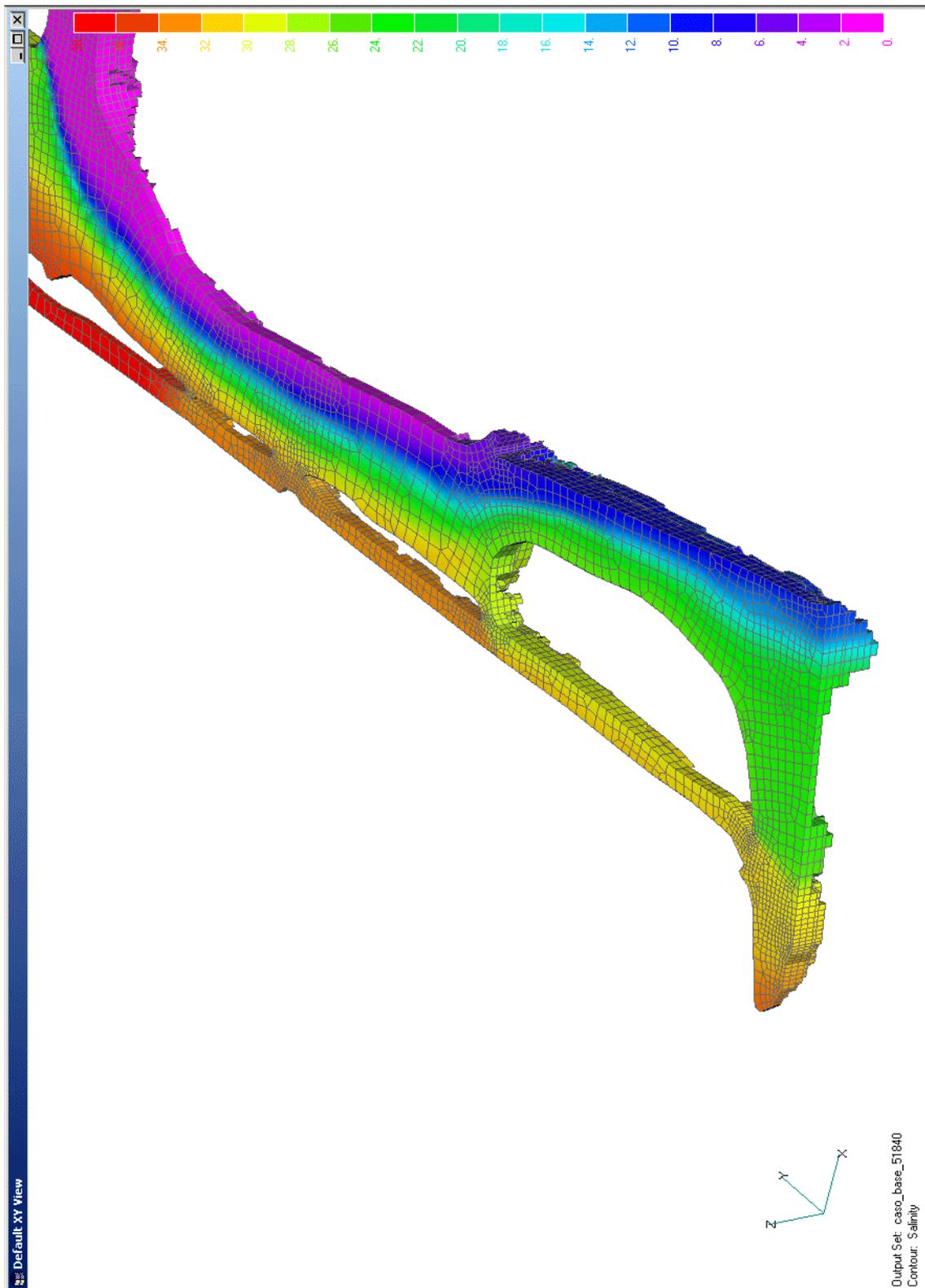


fig. 4.39 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento della salinità (g/l). Particolare della zona della foce

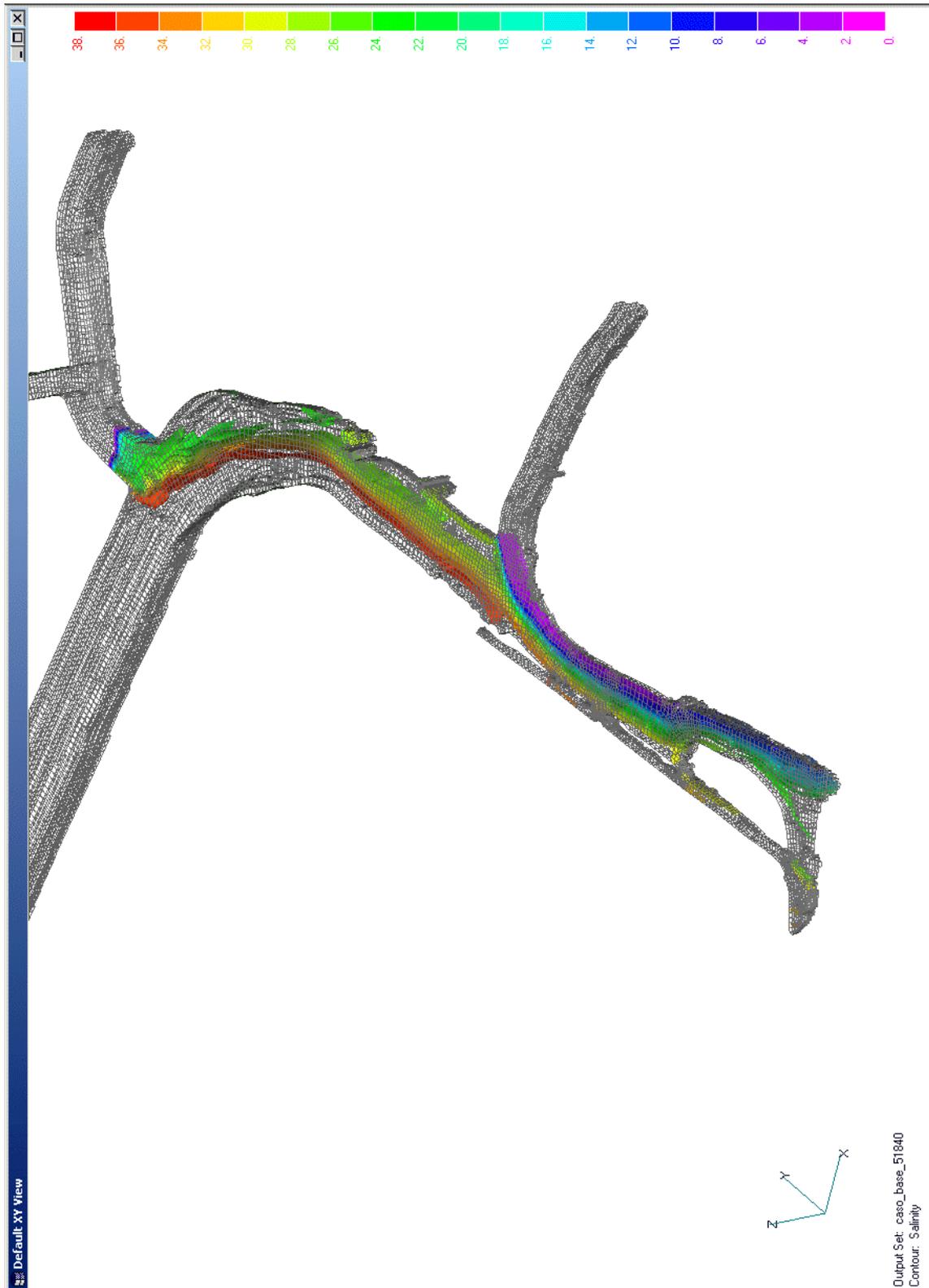


fig. 4.40 - Assetto a cicli combinati. Stato stazionario a pieno carico. Andamento dei gradienti di salinità (g/l)

4.3.3 *Simulazione del transitorio di marea: analisi dei risultati nelle condizioni di minimo crescente*

La condizioni di esercizio a pieno carico in condizioni stazionarie ha consentito di avere una prima idea di come i diversi corpi idrici del sistema si influenzano reciprocamente; ciò consente di valutare meglio l'effetto che la marea, risalendo il corso del Timavo e del Locavaz, ha sull'idrodinamica del sistema e quindi sulla dispersione del pennacchio termico proveniente dallo scarico. In particolare la marea, con un ritmo semidiurno, alza ed abbassa il livello del mare alla foce rispetto al livello medio imperturbato, forzando acqua di mare in ingresso al sistema e successivamente invertendone il moto. Si determina quindi una sorta di azione di pompaggio di acqua di mare nel sistema Lisert-Timavo che raggiunge i valori massimi in corrispondenza del minimo crescente e del massimo decrescente presenti nell'andamento periodico del livello di marea. Qui di seguito viene esaminata la condizione di dispersione che si determina nel sistema in corrispondenza del minimo crescente, mentre nel paragrafo successivo viene esaminata la condizione di massimo.

Analizzando i risultati della simulazione emerge che:

- a) in fig. 4.41 è riportato l'andamento del campo di moto in termini di velocità totale. Sono ancora applicabili tutte le considerazioni già discusse a proposito della dispersione termica nell'assetto attuale, soprattutto per quanto riguarda il regime stratificato che si instaura a partire dal canale Lisert e che non era presente nella simulazione stazionaria senza marea. Rispetto però alle condizioni attuali di scarico, la considerazione dell'assetto a ciclo combinato, comportando una minore portata totale immessa nel canale Lisert, porta ad una diminuzione dei valori di velocità nel canale stesso e nel primo tratto del Locavaz, come si nota esaminando le distribuzioni per le sezioni 2 e 5 riportate in fig. 4.42 e fig. 4.43. Viceversa, non vi sono apprezzabili modifiche nella distribuzione di velocità rilevata nella sezione 8, collocata qualche centinaio di metri dopo della confluenza del Locavaz con il Timavo, il campo di moto nella sezione verticale è mostrato in dettaglio nella fig. 4.44. In questo caso, si evidenziano ancora valori di circa 0.6 m/s alla superficie in corrispondenza della verticale più profonda, e valori di 0.2÷0.3 m/s per le altre verticali;
- b) assai interessante è invece la considerazione dell'andamento del campo di temperatura per l'intero dominio riportato in fig. 4.45, se confrontato con quello ottenuto nella simulazione in assetto attuale di fig. 4.14 è riportato. La distribuzione della temperatura, in superficie e negli strati inferiori, è sempre condizionata in modo fondamentale dalla marea, crescente dal valore minimo nelle condizioni qui considerate, oltretutto dallo scarico della centrale. In primo luogo, l'andamento della dispersione termica nel canale Lisert non differisce di molto da quella ottenuta in assetto attuale, presentando sempre una risalita di acqua dolce e fredda dal Moschenitze per la quasi totalità della sua lunghezza, che interessa uno strato superficiale variante da 0.5 ad 1 m, ad eccezione della zona immediatamente antistante lo scarico ove la turbolenza mantiene l'acqua calda fino in superficie. Questa stratificazione si presenta anche nel successivo tratto del Locavaz, pressoché con le stesse proprietà, finché non si arriva alla confluenza con il Timavo, ma ora lo spessore dello strato tende a diminuire. In queste condizioni, se è vero che nelle sezioni a monte della confluenza con il Timavo le condizioni medie appaiono non fortemente modificate (fig. 4.47 e fig. 4.48), l'apporto delle acque del Timavo incrementa in modo più accentuato il raffreddamento dello strato intermedio caldo, come si vede nell'esame della sezione 5 e

soprattutto della sezione 8, prossima alla foce (fig. 4.49 e fig. 4.50). Questo comportamento è particolarmente evidente se si esamina la fig. 4.46; essa infatti mostra l'andamento dei gradienti di temperatura, nei valori corrispondenti alla scala a fianco indicata, che danno un'idea dei fronti di temperatura che si muovono nel dominio. I gradienti sono sempre distribuiti verticalmente, con la parte inferiore del dominio assai omogenea, ma nel tratto terminale in prossimità della foce i valori si riducono;

- c) nella fig. 4.51 è invece riportata la distribuzione della salinità nel dominio. Essa assume di fatto un andamento molto simile a quello della temperatura, essendo anch'essa condizionata sia dalla marea che dallo scarico della centrale, e presenta un andamento stratificato esattamente corrispondente a quello della temperatura.

Concludendo, nelle condizioni di pieno carico nell'assetto a cicli combinati e minimo livello di marea qui considerate, si constata sempre la presenza nella sezione di foce di uno strato caldo e salato, compreso tra uno strato superficiale freddo ed uno strato salato freddo profondo, ma la cui temperatura si riduce a 29 °C rispetto al valore di 30 °C riscontrati nell'assetto attuale. Nelle condizioni di minimo livello di marea, pertanto, si ottiene con l'assetto a cicli combinati una sensibile riduzione della temperatura dello strato caldo alla foce.

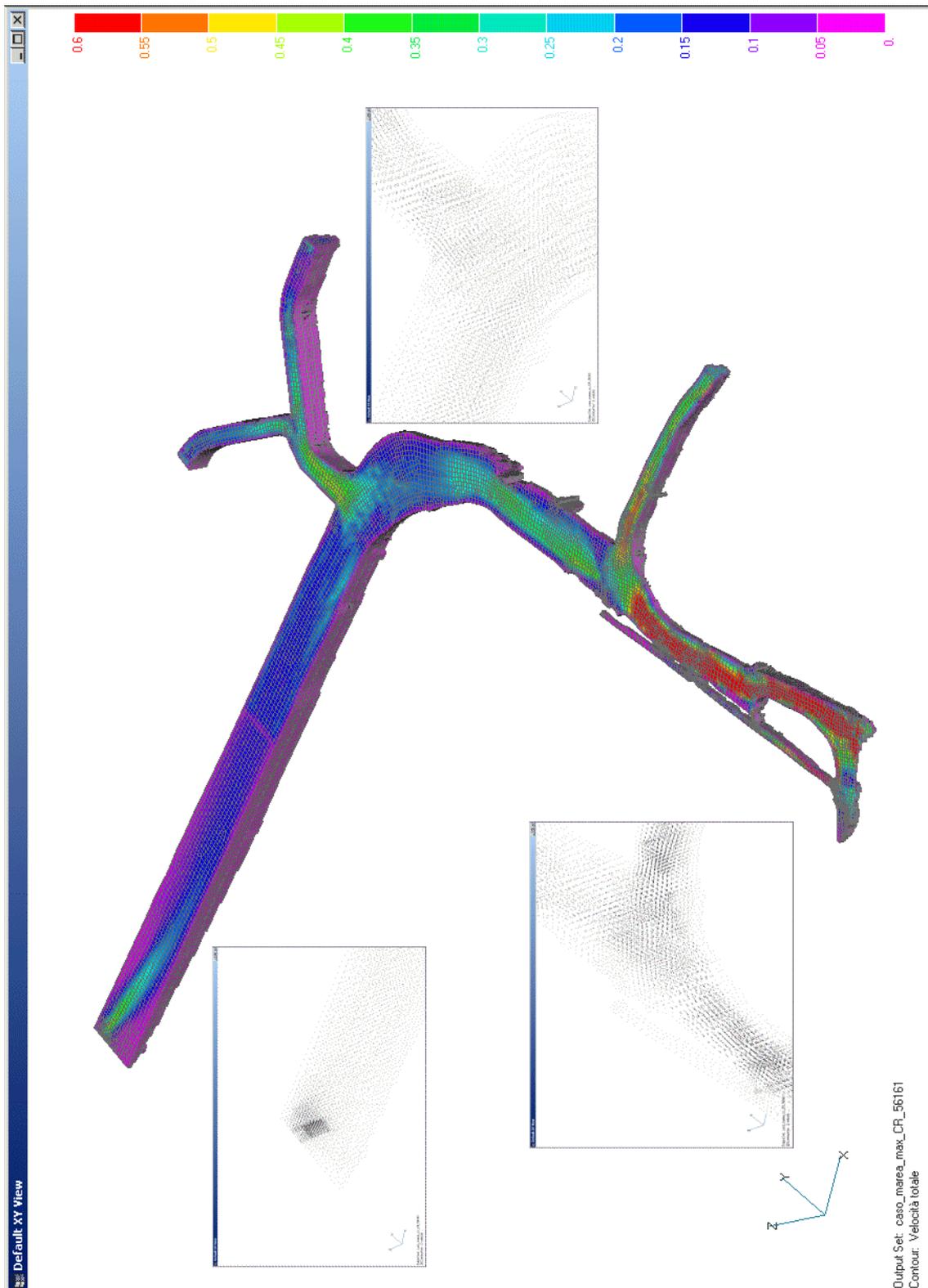


fig. 4.41 – Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento della velocità (m/s)

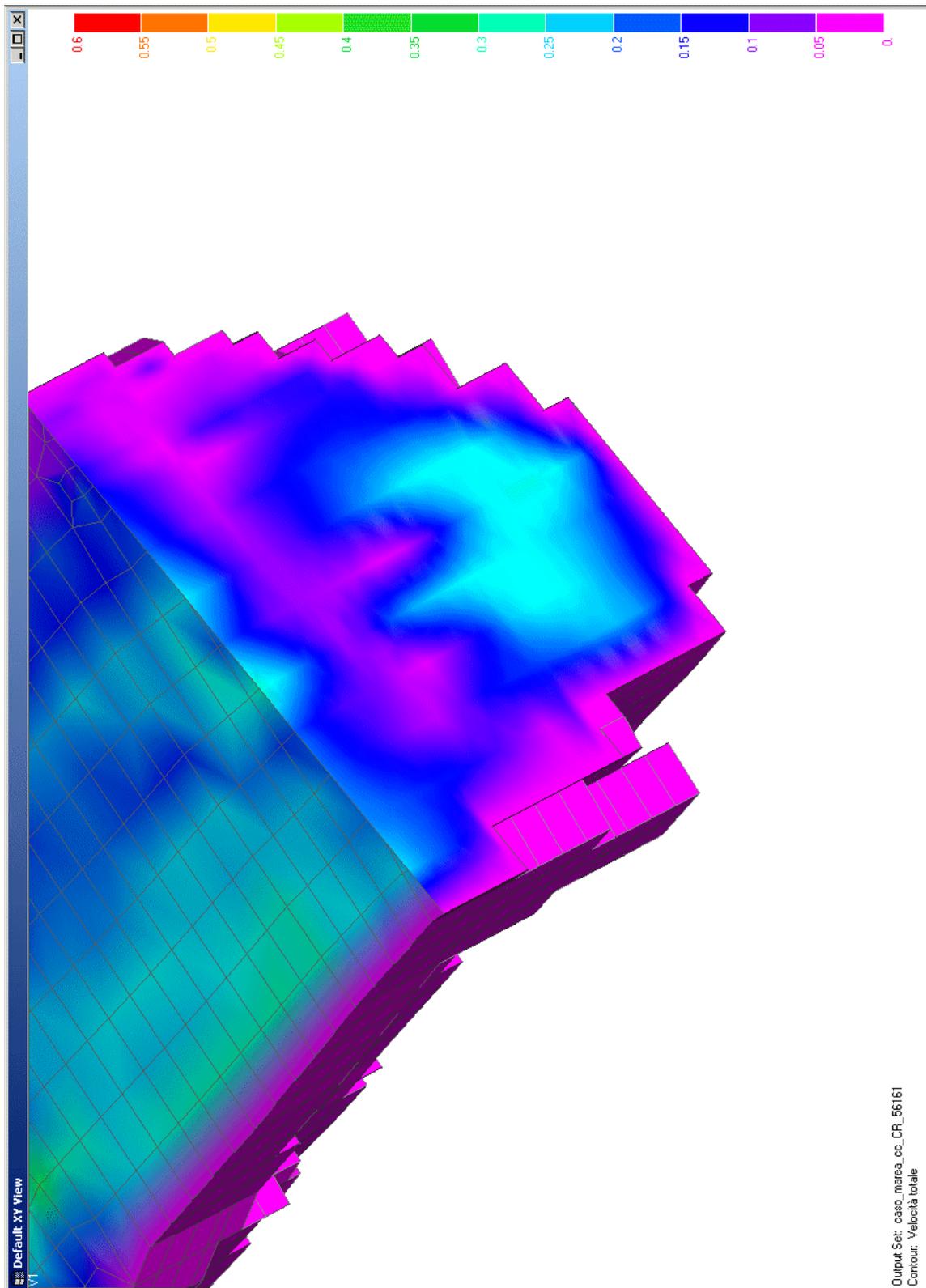


fig. 4.42 – Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 2 (m/s)

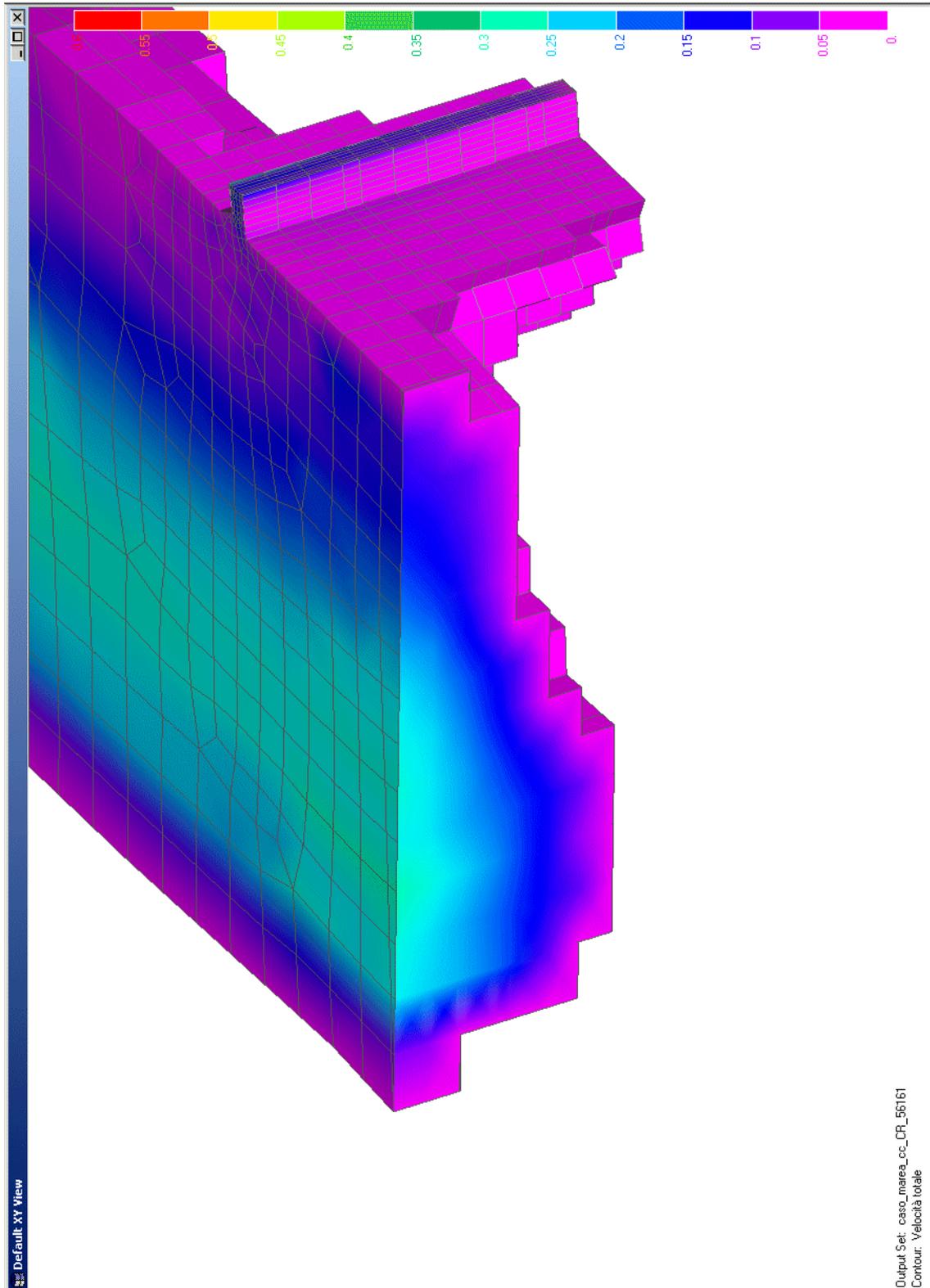


fig. 4.43 – Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 5 (m/s)

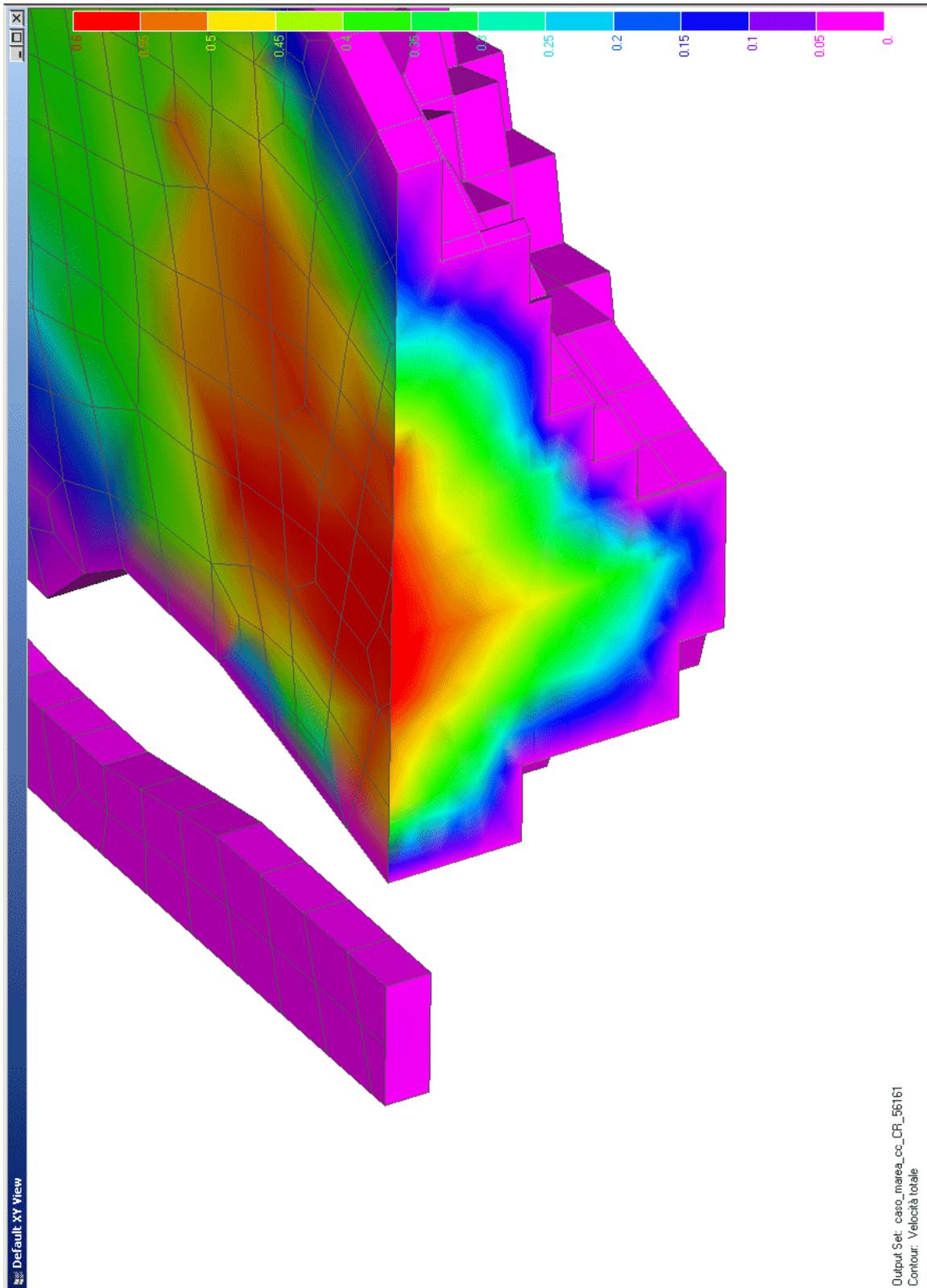


fig. 4.44 – Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 8 (m/s)

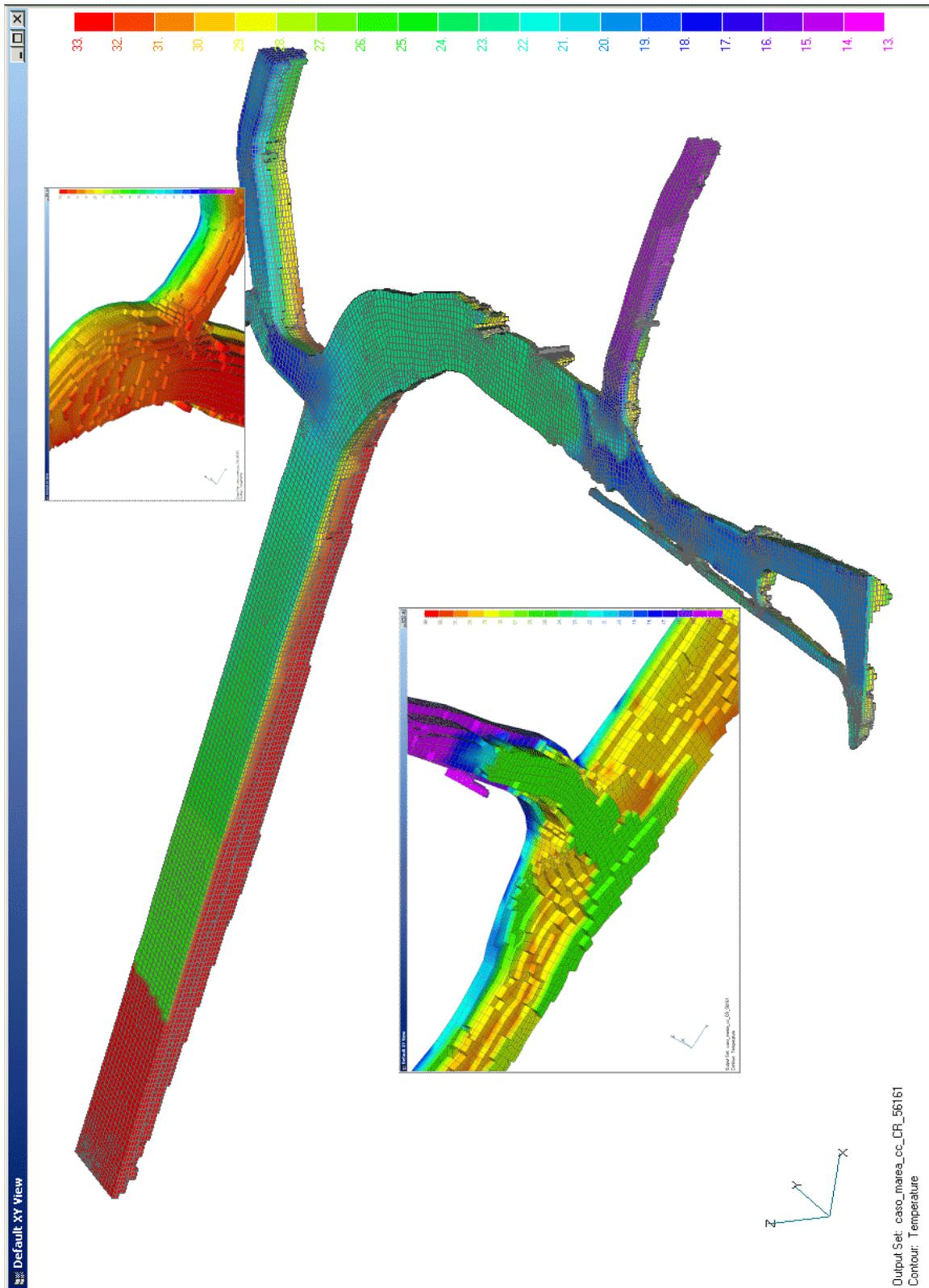


fig. 4.45 – Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento della temperatura (°C)

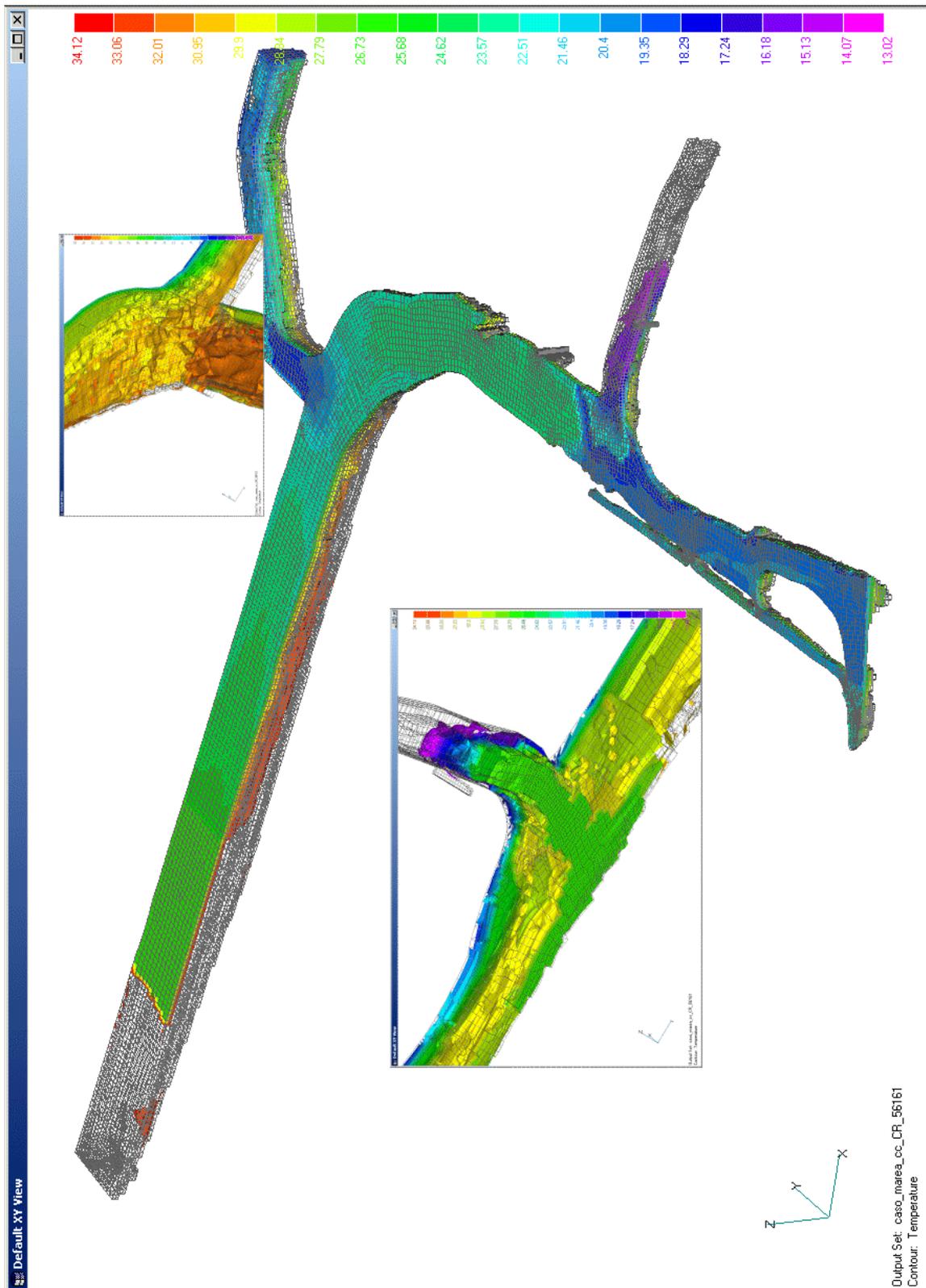


fig. 4.46 – Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento dei gradienti di temperatura (°C)

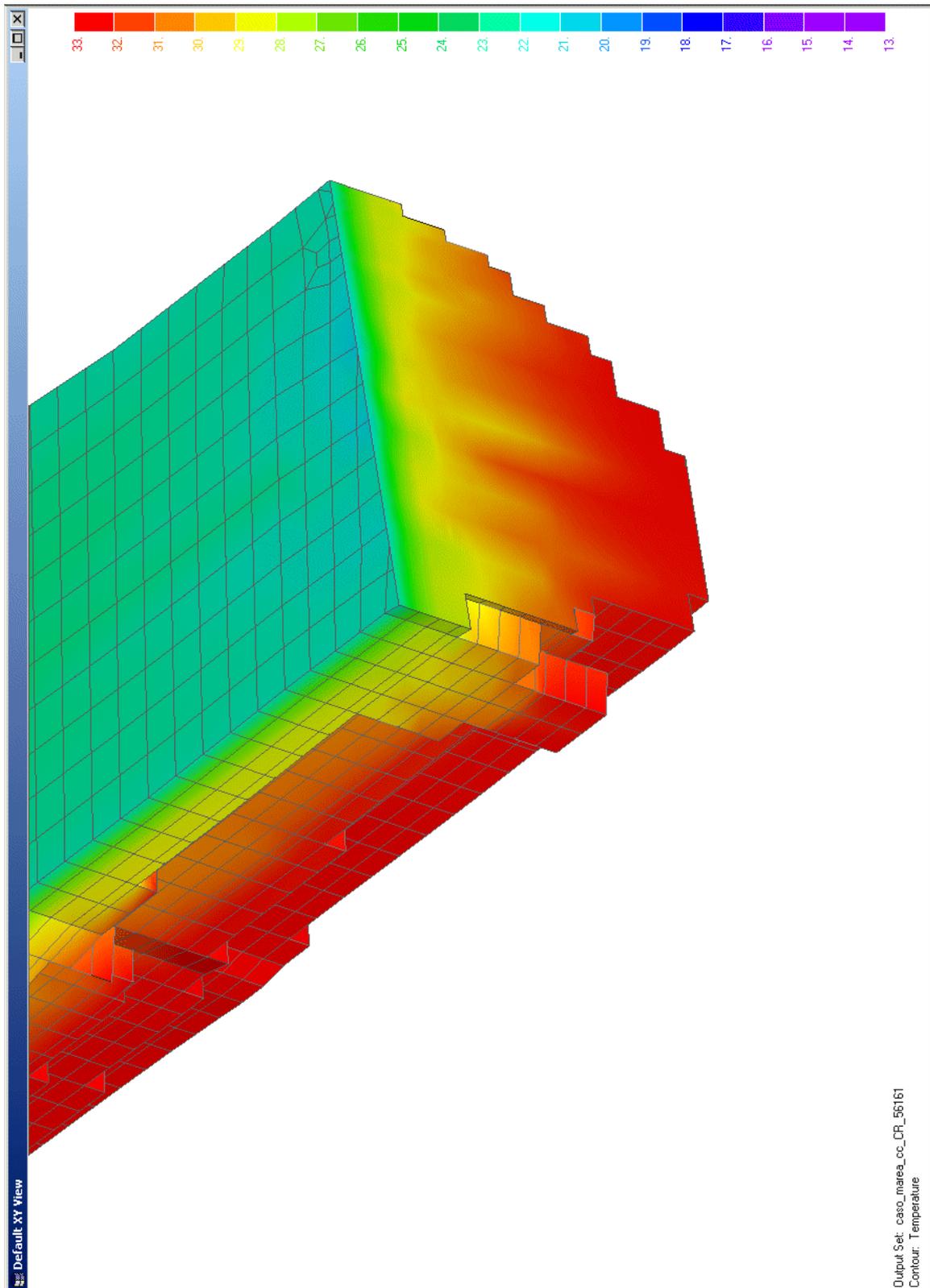


fig. 4.47 – Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 2 (°C)

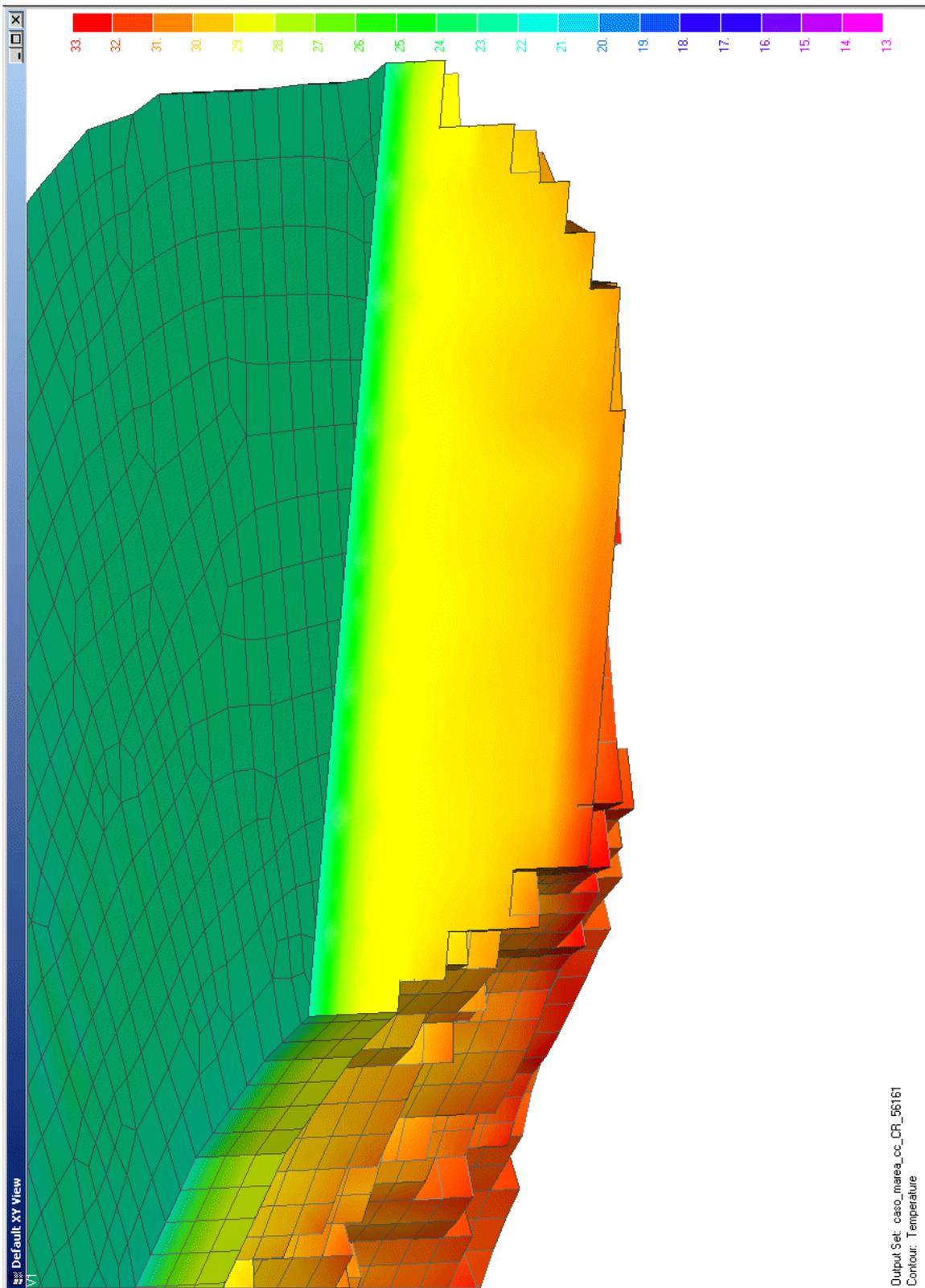


fig. 4.48 – Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 4 (°C)

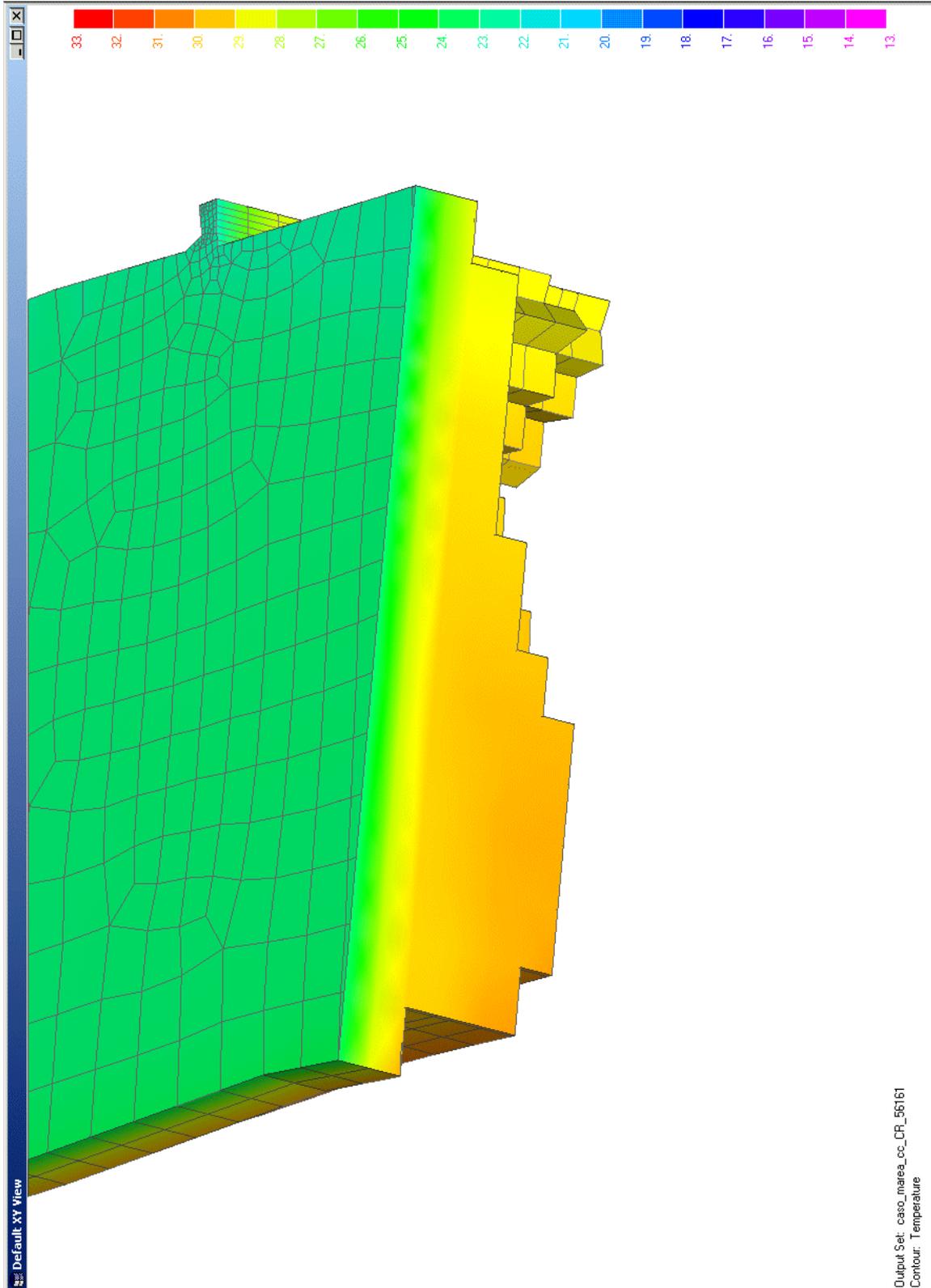


fig. 4.49 – Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 5 (°C)

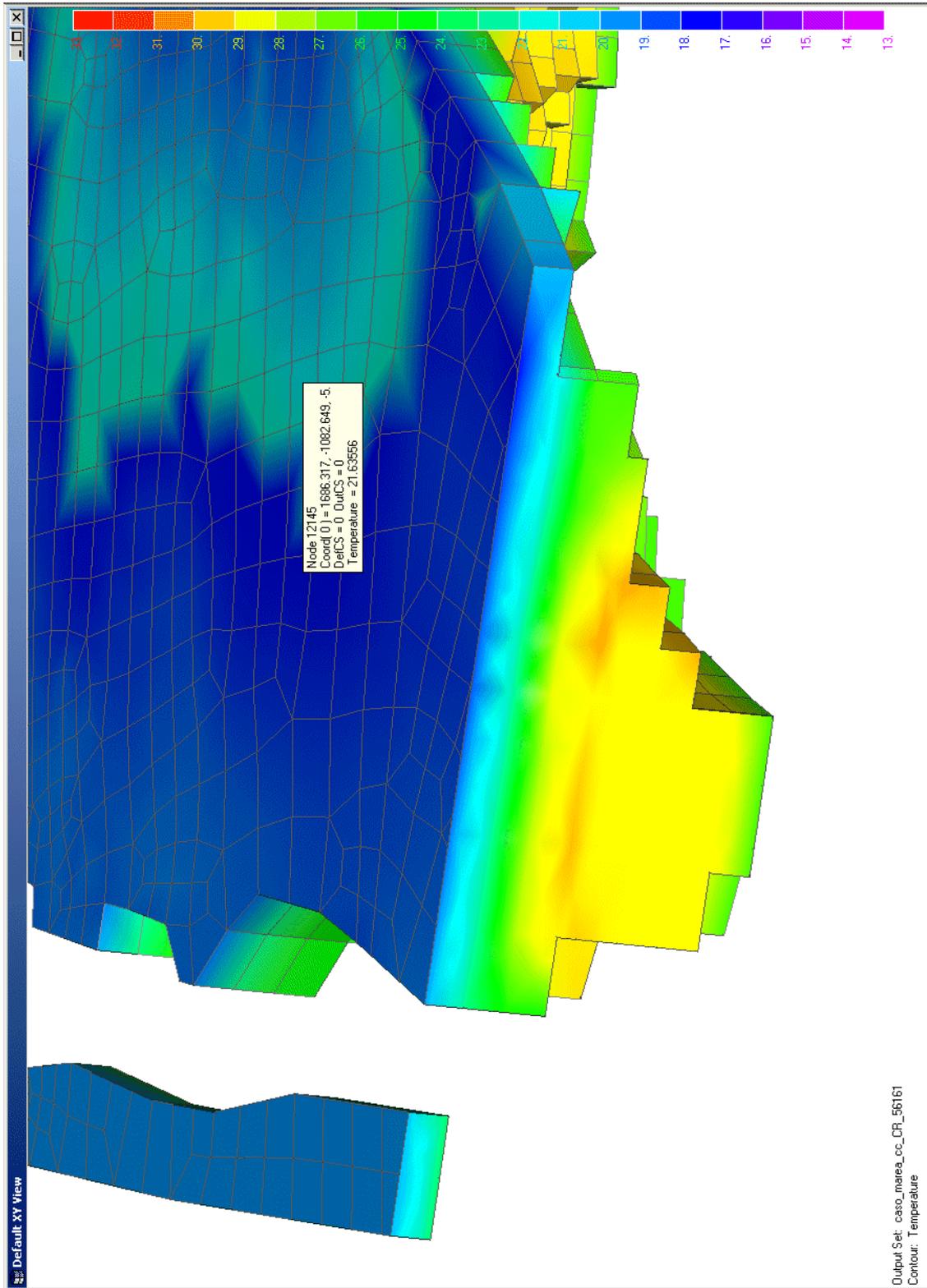


fig. 4.50 – Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Temperatura nella sezione 8 (°C)

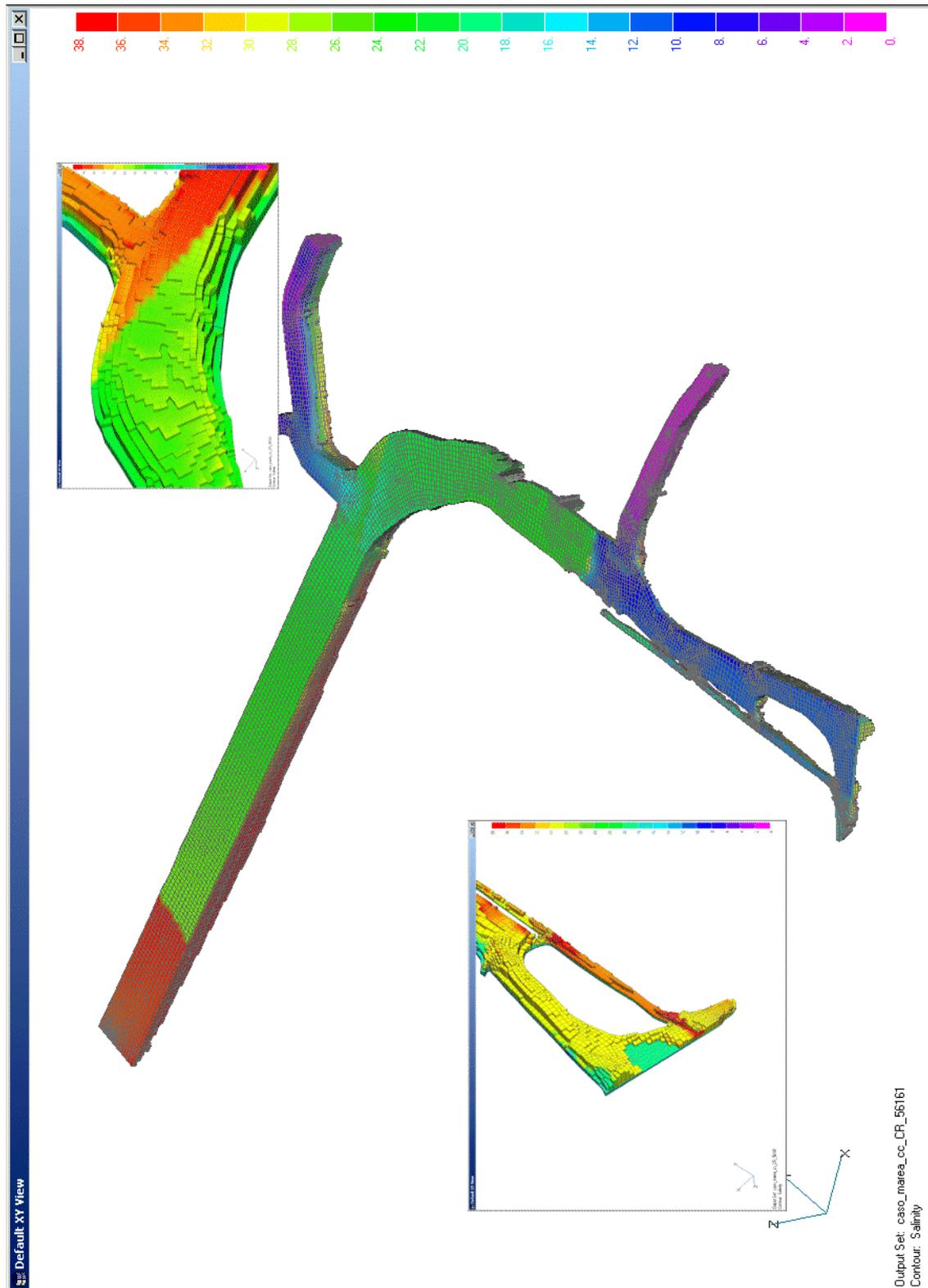


fig. 4.51 – Assetto a cicli combinati. Minimo di marea. Andamento della salinità (g/l)

4.3.4 *Simulazione del transitorio di marea: analisi dei risultati nelle condizioni di massimo livello*

La condizioni di esercizio a pieno carico nell'assetto a cicli combinati è stata qui simulata ipotizzando di porci nelle tipiche condizioni estive in presenza di massimo livello di marea:

- a) per quanto riguarda l'andamento del campo di moto in termini di velocità totale, nelle figure dalla fig. 4.52 alla fig. 4.55 sono riportate le distribuzioni totale e nelle sezioni di interesse, coincidenti con quelle già considerate per il livello minimo. In particolare, valgono le medesime considerazioni di carattere generale già riportate nell'analisi precedente, con la considerazione aggiuntiva che ora il vettore velocità è in generale orientato verso il mare per tutti gli strati, superficiale e profondo, con valori di velocità inferiori in quest'ultimo essendosi appena verificato il massimo e quindi essendo iniziato il deflusso dell'acqua di mare che aveva risalito il bacino durante la fase di marea crescente precedente;
- b) per quanto riguarda l'andamento del campo di temperatura, nelle figure dalla fig. 4.56 alla fig. 4.61 sono riportate le distribuzioni totale e nelle sezioni di interesse, coincidenti con quelle già considerate per il livello minimo. In particolare, valgono in linea generale le medesime considerazioni già riportate nelle condizioni di minimo di marea, con l'ulteriore considerazione che in questo caso il modello risponde con un aumento della temperatura media dello strato superficiale;
- c) l'andamento di salinità è riportato in fig. 4.62, e mantiene le stesse caratteristiche già discusse per la distribuzione di temperatura.

Infine, nelle condizioni di pieno carico e massimo livello di marea qui considerate, si constata la presenza nella sezione di foce di uno strato caldo e salato, compreso tra uno strato superficiale freddo ed uno strato salato freddo profondo, avente temperatura dell'ordine di 28 °C, inferiore quindi di circa 1 °C alla temperatura riscontrata nell'assetto attuale nelle medesime condizioni ambientali..

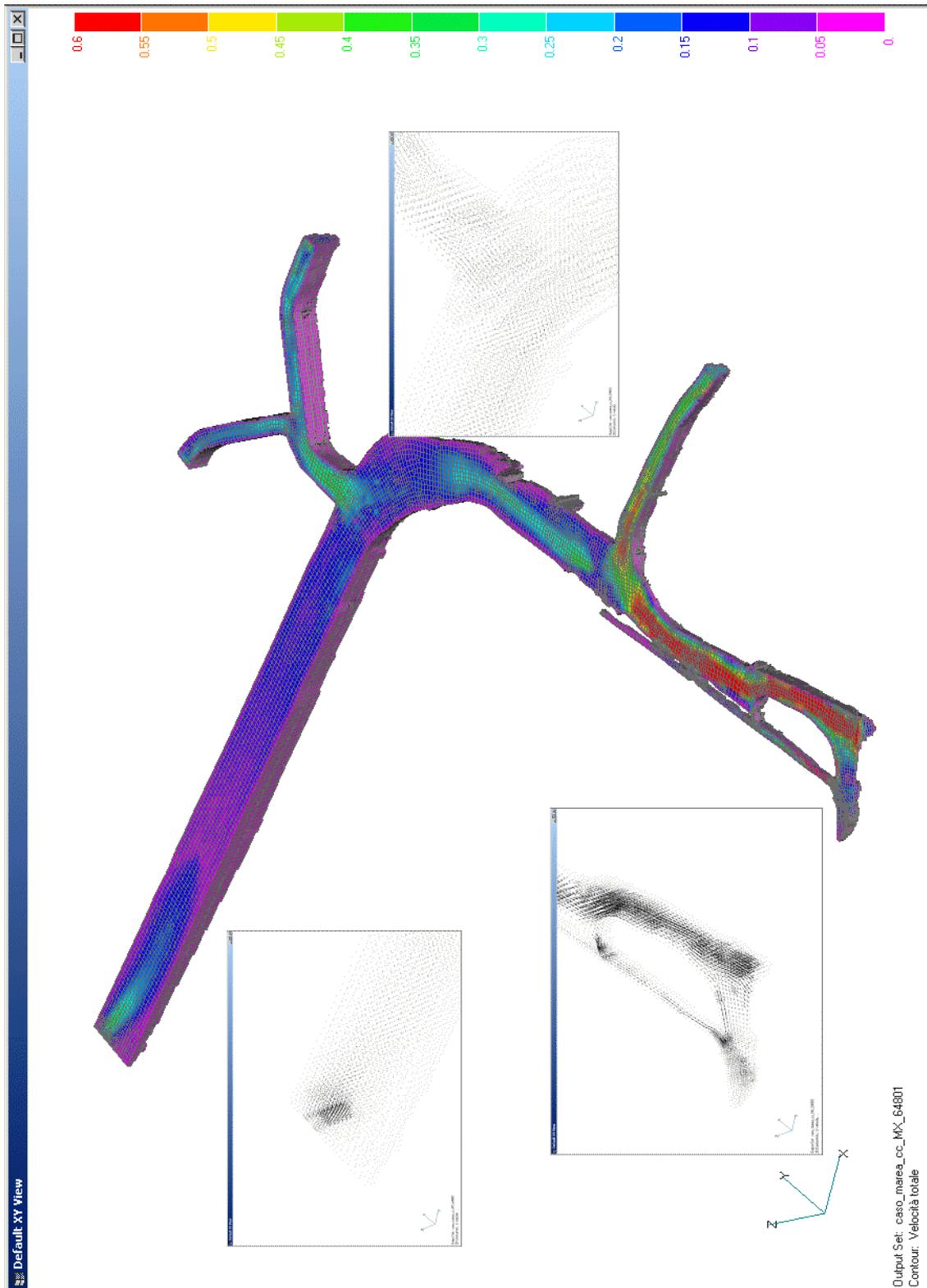


fig. 4.52 Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento della velocità (m/s)

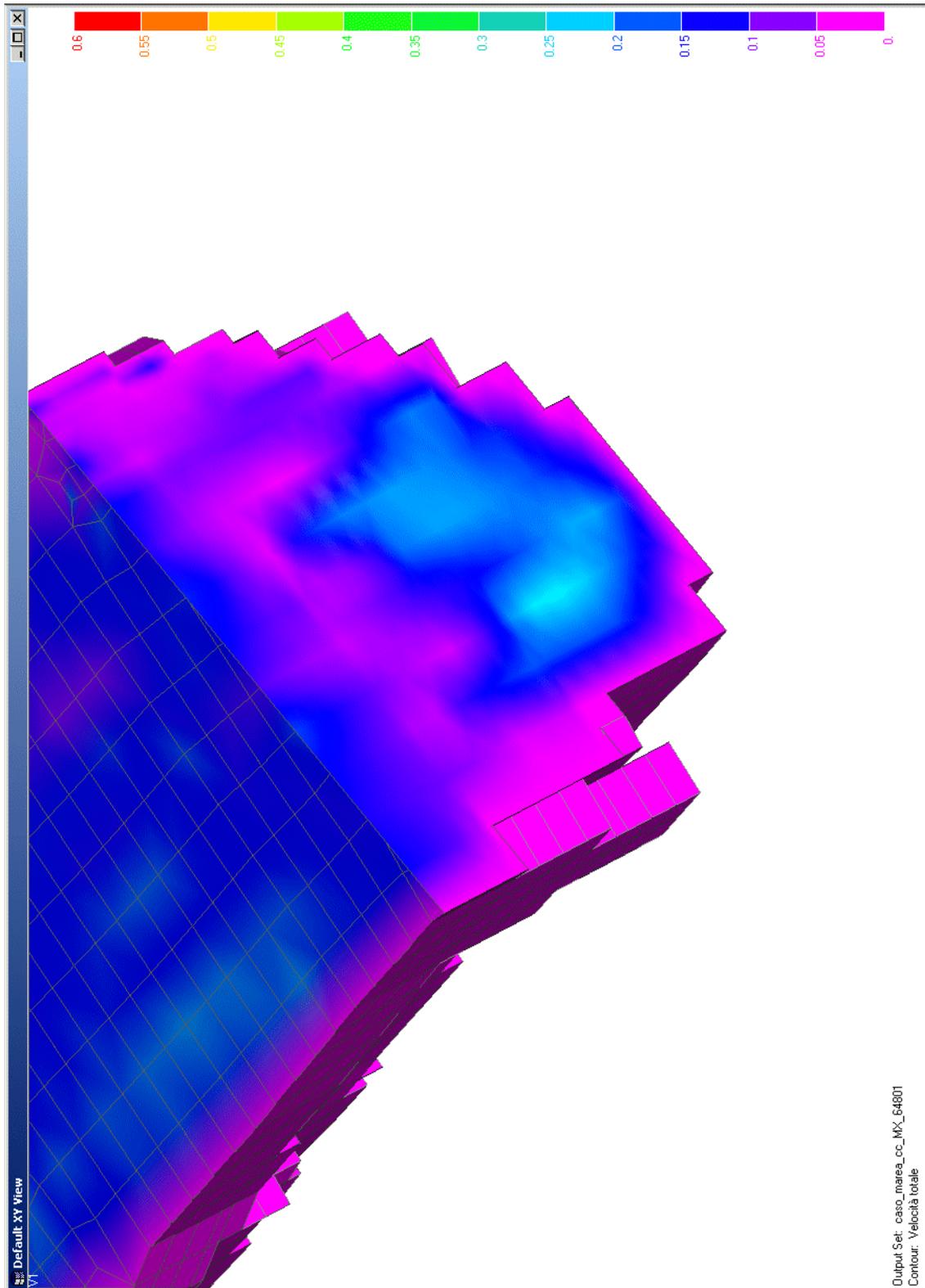


fig. 4.53 – Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 2 (m/s)

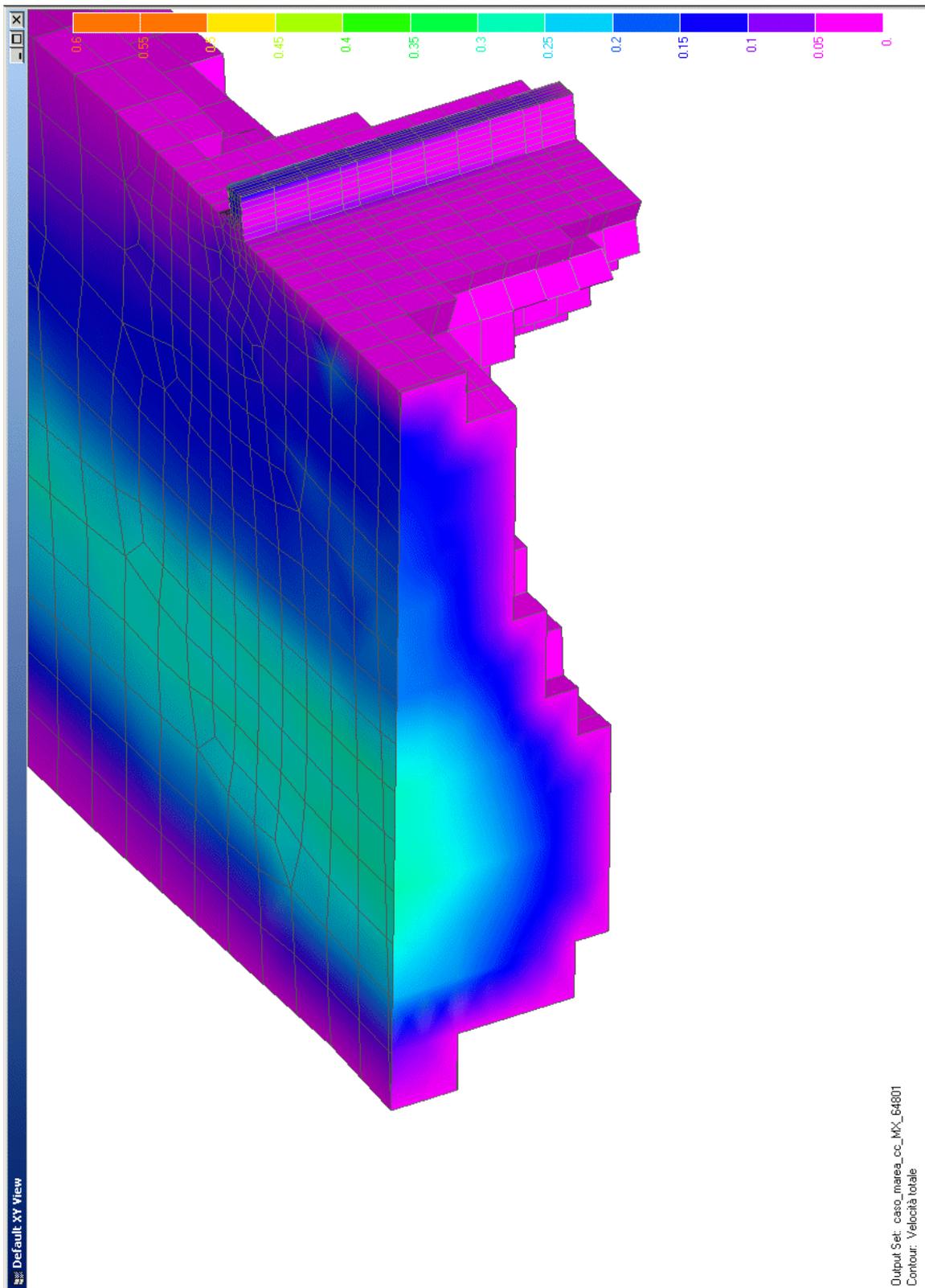


fig. 4.54 – Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 5 (m/s)

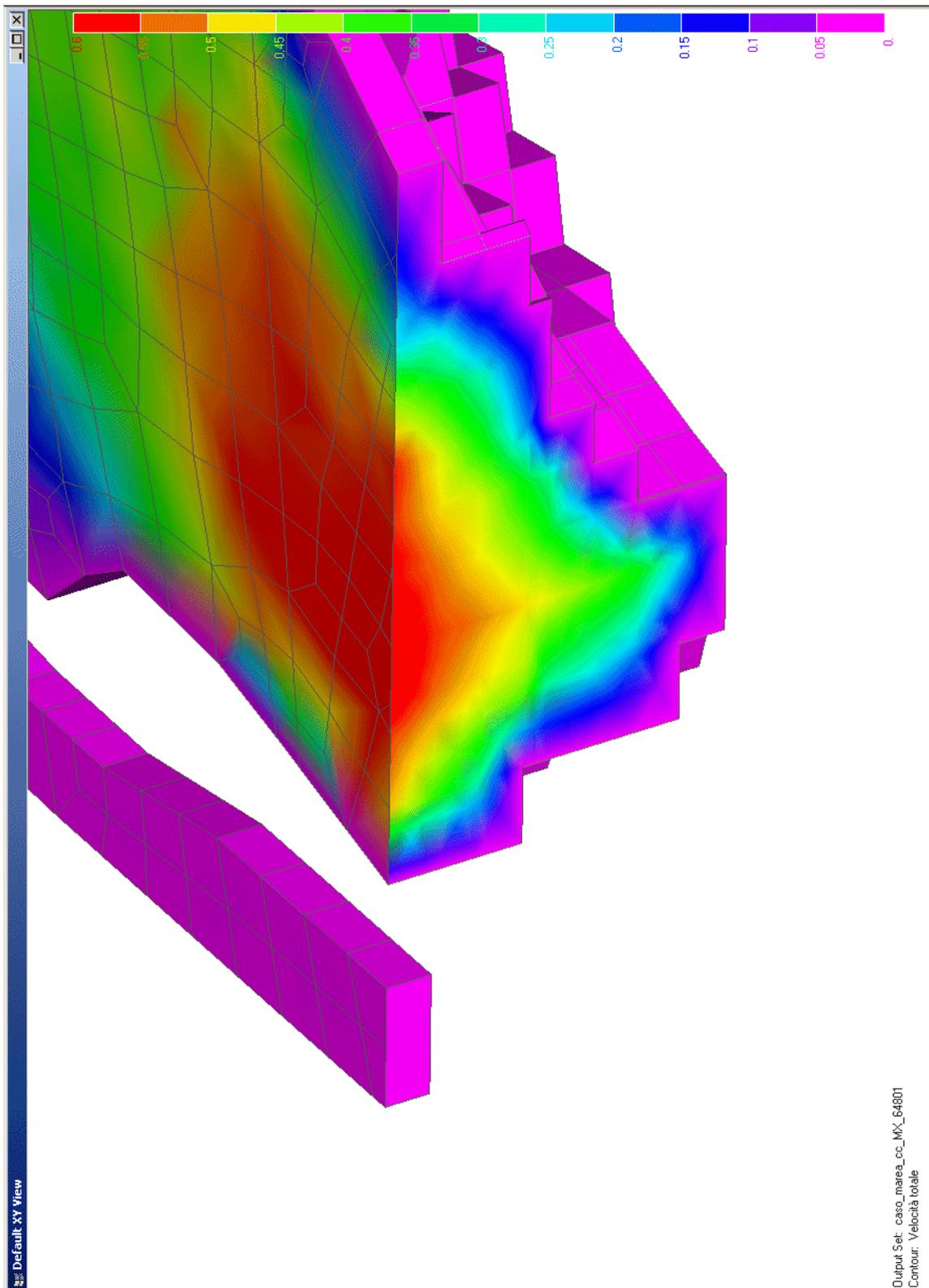


fig. 4.55 – Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento della velocità nella sezione 8 (m/s)

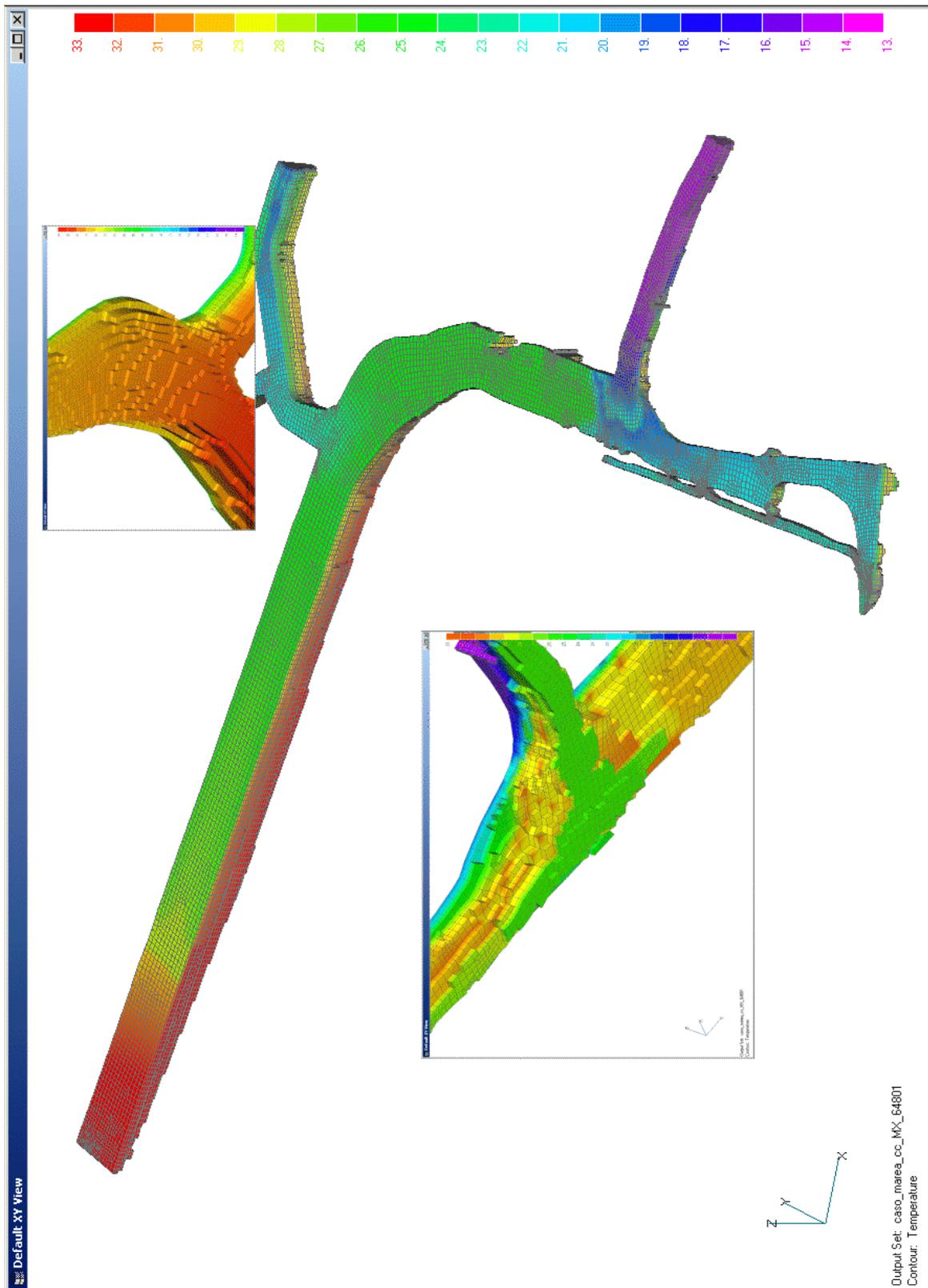


fig. 4.56 – Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento della temperatura (°C)

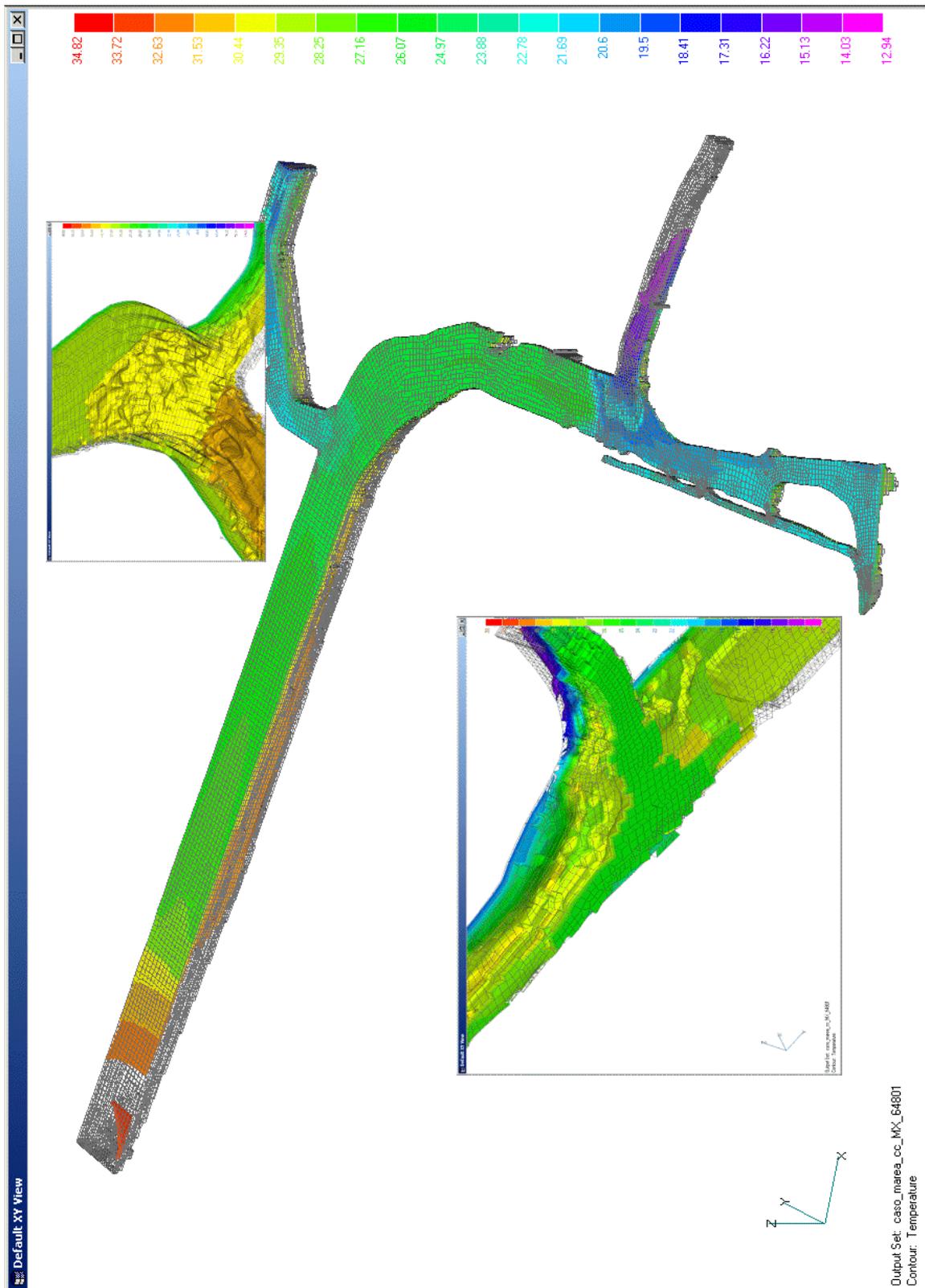


fig. 4.57 – Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento dei gradienti di temperatura (°C)

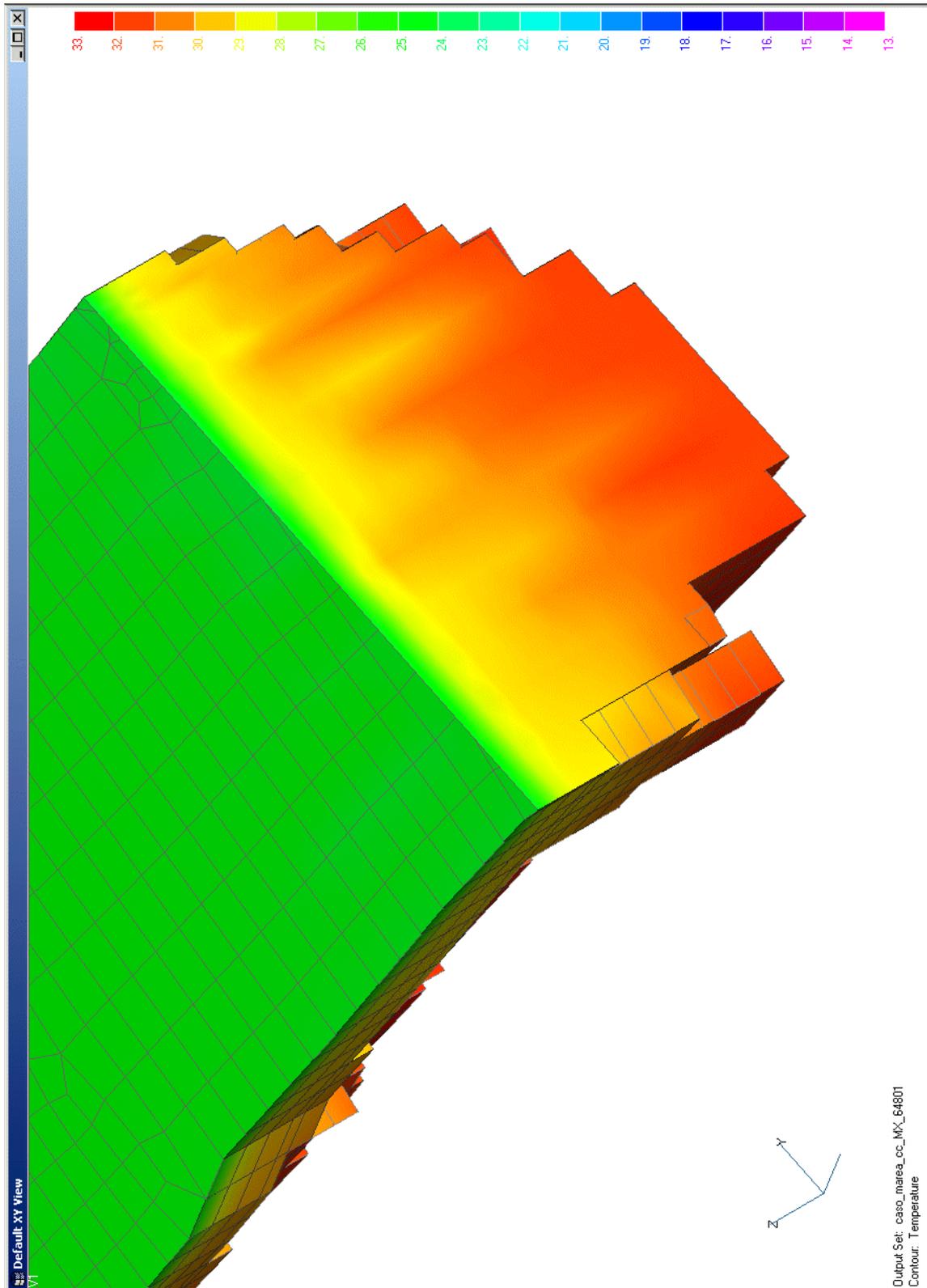


fig. 4.58 – Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 2 (°C)

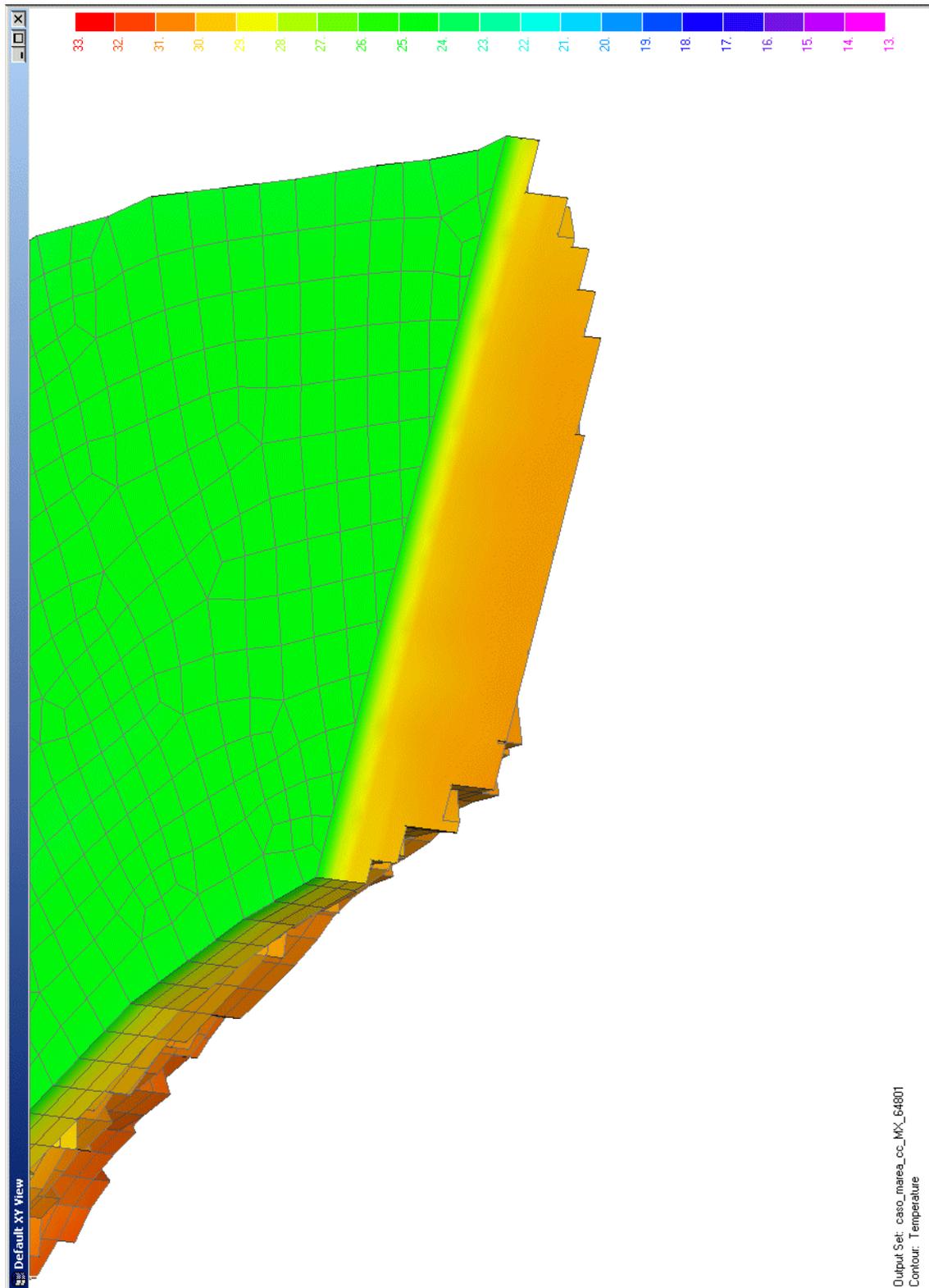


fig. 4.59 – Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 4 (°C)

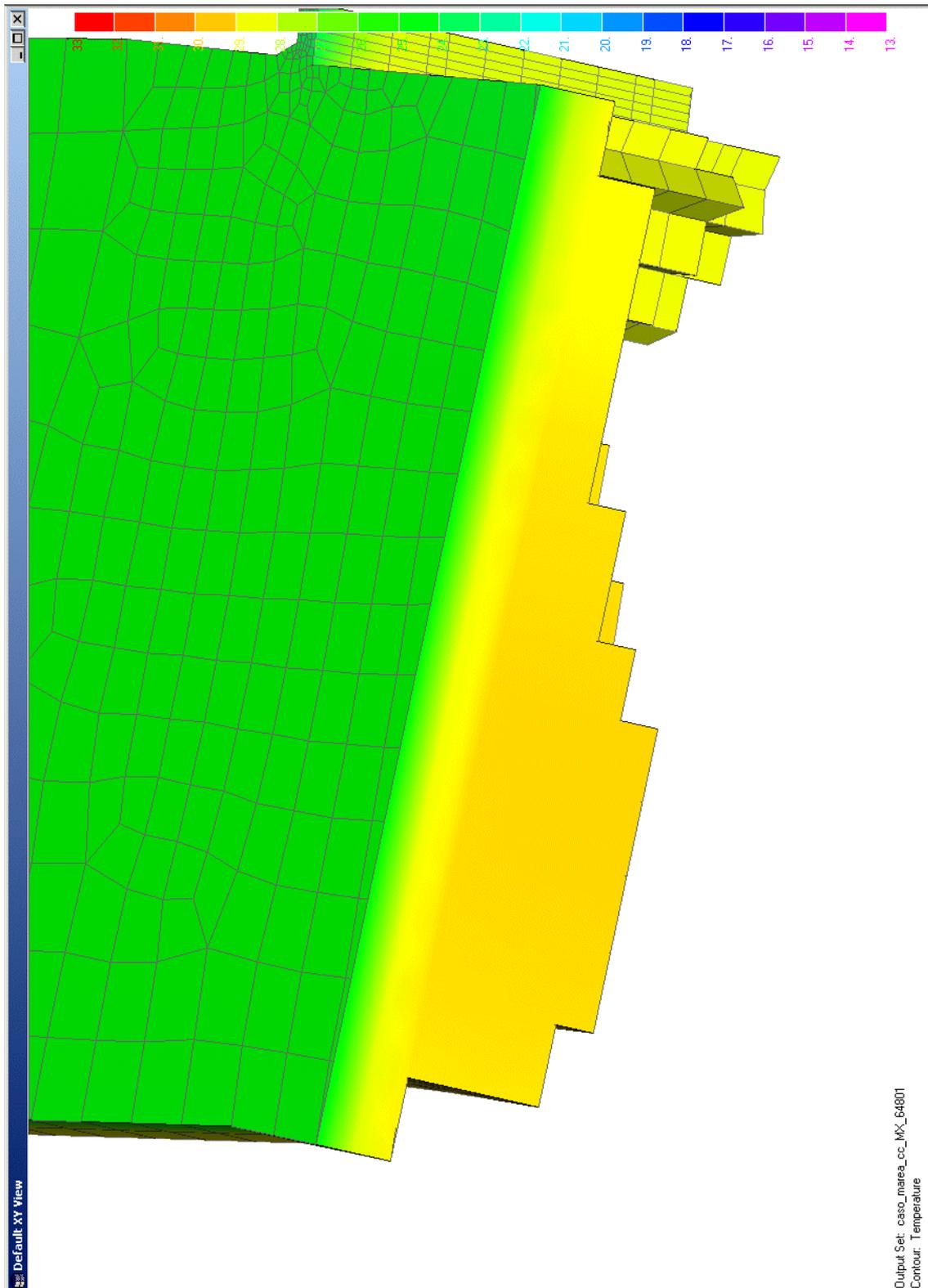


fig. 4.60 – Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 5 (°C)

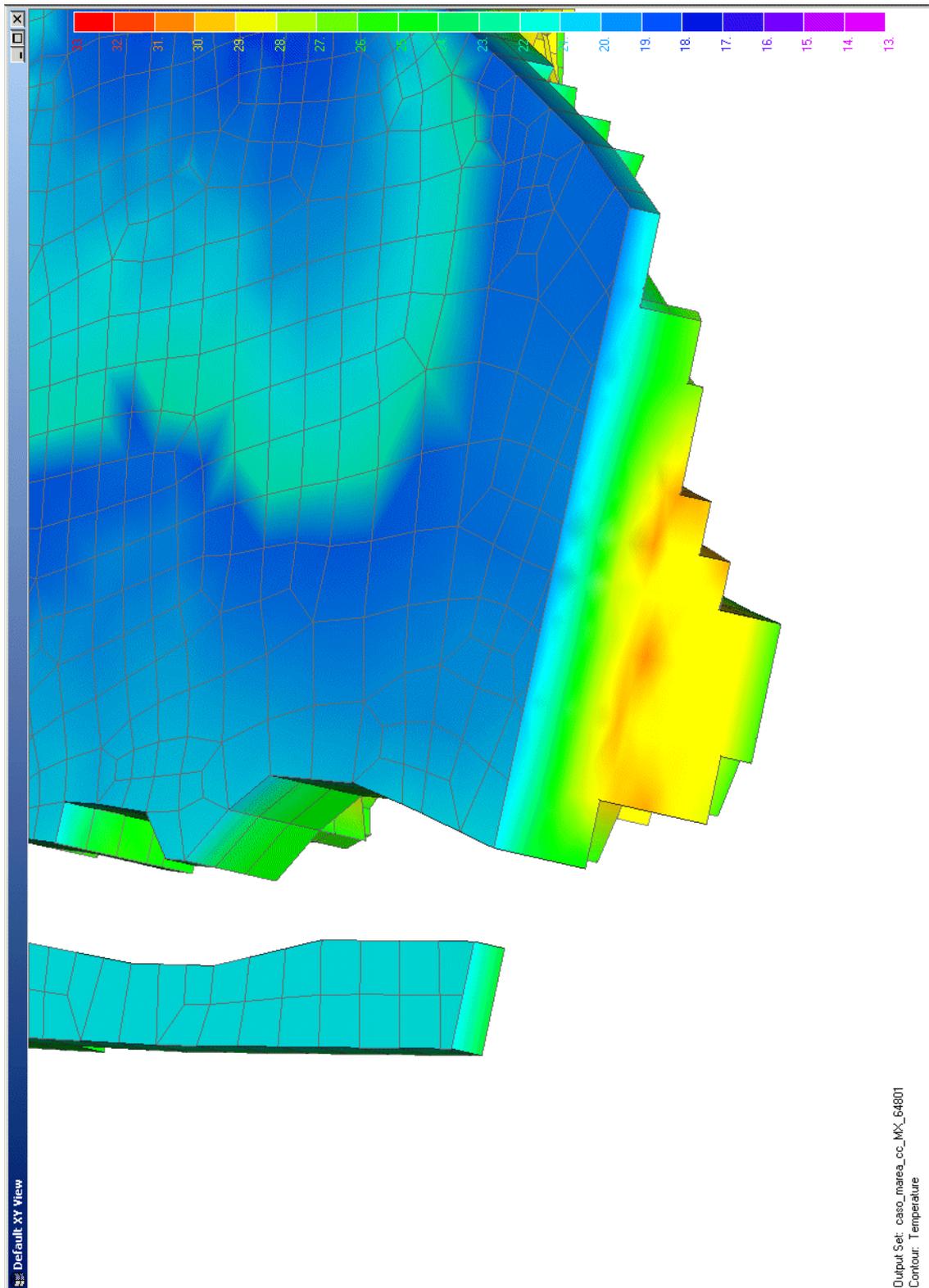


fig. 4.61 – Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Temperatura nella sezione 8 (°C)

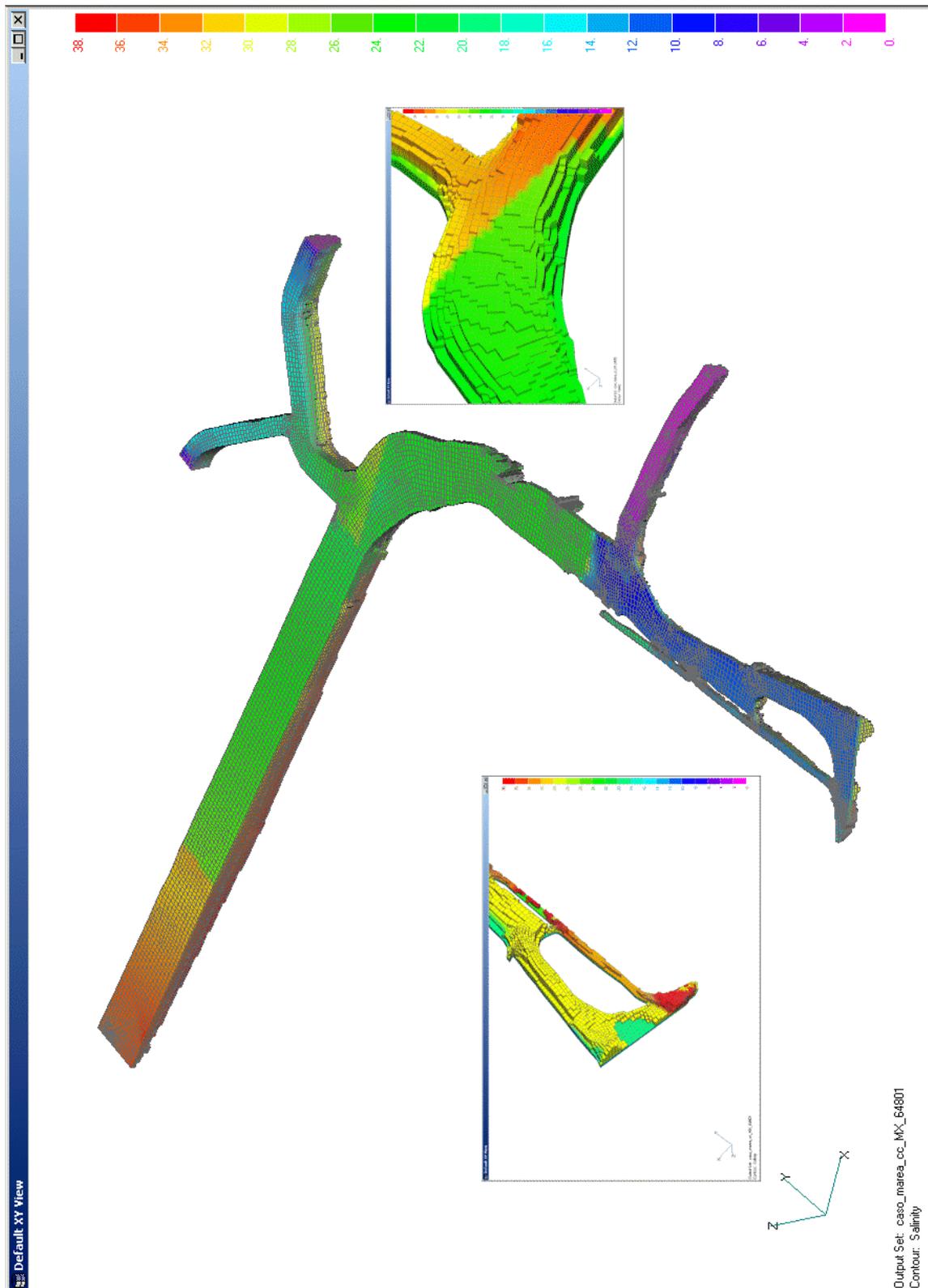


fig. 4.62 – Assetto a cicli combinati. Massimo di marea. Andamento della salinità (g/l)

5 CONCLUSIONI

La realizzazione di un modello tridimensionale di simulazione per l'intero bacino del Lisert-Timavo, in grado di simulare in modo dettagliato i fenomeni che si riscontrano nel comportamento idrodinamico dei corpi idrici ad esso interessati, ha consentito di valutare in maniera estremamente dettagliata l'impatto della trasformazione a cicli combinati della centrale di Monfalcone sulla dispersione termica delle acque di raffreddamento nell'intero bacino fino al mare.

Gli effetti dovuti ad apporti idrici di natura e parametri fisici assai diversi e della marea sono stati tenuti in debita considerazione giungendo a definire, per tutto il dominio di interesse, la distribuzione di velocità, temperatura e salinità sia per le condizioni di scarico presenti nell'assetto attuale di centrale, sia in quelle derivanti dalla trasformazione a ciclo combinato della sezione 4 e dismissione della sezione 3.

La diminuzione della quantità di calore complessivamente scaricato porta ad affermare che, specialmente in condizioni in cui non si presentano forti stratificazioni od in cui la dispersione termica risulta più efficiente, quali quelle invernali, la trasformazione comporta un miglioramento netto delle condizioni di dispersione termica stessa.

Da precedenti studi è emerso che esistono condizioni, tipicamente estive, in cui l'acqua di raffreddamento scaricata dalla centrale si stratifica al di sotto della superficie del corpo idrico ricevente, perdendo il contributo al suo raffreddamento dato dallo scambio termico con l'atmosfera, con una diluizione legata esclusivamente allo scambio con gli strati circostanti più freddi. Per tali ragioni è stata condotta una simulazione numerica con il modello tridimensionale sopra citato, nelle condizioni corrispondenti all'esercizio a pieno carico della centrale, in entrambi gli assetti, presente e futuro allo scopo di verificare se l'effetto positivo dovuto al ridotto calore scaricato sia presente anche in condizioni di stratificazione termica e salina. A tale proposito è opportuno ricordare che per tutte le simulazioni relative alla condizione futura a ciclo combinato si è fatto ricorso, in mancanza di dati sperimentali, a bilanci termici di progetto (sia per il contributo del nuovo gruppo che per i gruppi 1 e 2 attuali). Ciò comporta una sovrastima della potenza termica scaricata e del relativo sovrizzo termico rispetto alla reale condizione di esercizio, che si traduce in una condizione comunque conservativa ai fini dello studio in oggetto.

Dalle risultanze del calcolo è emerso che, anche in condizioni stratificate, le condizioni di scarico in assetto a cicli combinati risultano migliorative rispetto a quelle attualmente esercite, con una riduzione di circa 1 °C della temperatura dello strato caldo in corrispondenza della foce.