



DCFA

DIPARTIMENTO DI CHIMICA, FISICA E AMBIENTE

Rapporto tecnico per: OMEV, Officine Meccaniche Elettriche Vadesi

VALUTAZIONE NUMERICA DELL'EFFICIENZA DI  
CAPTAZIONE DI COMPONENTI DEL SISTEMA DI  
ESTRAZIONE FUMI DEL REPARTO COKERIA  
DELLO STABILIMENTO ILVA DI TARANTO

M. Campolo

Udine, 6 Luglio, 2015

RT 01-15-v2

## Sommario

L'obiettivo di questo studio è valutare le prestazioni di due sistemi di aspirazione progettati per far parte del sistema di captazione e trattamento fumi delle batterie forni coke 7-12 dello stabilimento Ilva di Taranto. I due sistemi di aspirazione includono:

1. una cappa di sfornamento fissa su guida coke;
2. una cappa di raffreddamento mobile motorizzata installata sul carro di spegnimento.

Le configurazioni di progetto (dimensioni geometriche e condizioni di funzionamento operative) per i due sistemi aspiranti sono state definite e fornite da OMEV.

La prima cappa aspirante funzionerà durante la fase di sfornamento e caricamento del coke sul vagone. La seconda cappa aspirante funzionerà una volta completato il caricamento del carro per tutta la fase di trasporto del coke dalla zona di sfornamento fino alla torre di spegnimento.

La configurazione geometrica di entrambe le cappe è stata studiata in modo da integrarsi con le strutture di impianto pre-esistenti e con i carri già in uso per la movimentazione del coke.

I risultati delle simulazioni numeriche indicano che

- le perdite di carico sono inferiori ai 100 Pa (10 mm  $H_2O$ );
- le aree di possibile trafileamento sono estremamente ridotte;
- la capacità di aspirare ed estrarre efficacemente i fumi prodotti dal coke, quantificata attraverso la valutazione per via numerica dell'efficienza entalpica, è elevata: 97% per la cappa di sfornamento e 98% per la cappa di raffreddamento;
- anche se nelle condizioni di installazione e funzionamento reale degli impianti è lecito attendersi delle riduzioni riguardo ai valori di efficienza di captazione qui calcolati, lo studio dimostra che i sistemi di estrazione contribuiranno comunque in modo molto significativo al contenimento delle emissioni fuggitive per il controllo delle quali sono stati predisposti.

I sistemi reali dovrebbero quindi risultare efficaci per la captazione delle emissioni diffuse che si producono durante lo sfornamento del coke e il suo caricamento sul carro, fino al trasporto alla torre di raffreddamento.

## Indice

<b>1</b>	Introduzione	<b>7</b>
<b>2</b>	Geometria	<b>8</b>
2.1	Cappa di sfornamento . . . . .	9
2.2	Cappa di raffreddamento (quenching) . . . . .	12
<b>3</b>	Metodo numerico	<b>15</b>
3.1	Campo di moto e campo termico . . . . .	15
<b>4</b>	Analisi del funzionamento della cappa di sfornamento	<b>17</b>
4.1	Campo di moto . . . . .	17
4.2	Campo di pressione . . . . .	19
4.3	Campo di temperatura . . . . .	19
<b>5</b>	Analisi del funzionamento della cappa di raffreddamento	<b>25</b>
5.1	Campo di moto . . . . .	25
5.2	Campo di pressione . . . . .	27
5.3	Campo di temperatura . . . . .	28
<b>6</b>	Valutazione delle prestazioni di funzionamento dei sistemi di captazione fumi	<b>32</b>
<b>7</b>	Conclusioni	<b>35</b>

---

## Elenco delle figure

1	Mappa di una batteria di forni di cokeria. La linea blu identifica la guida di sfornamento coke; la linea verde identifica la cappa di sfornamento; la linea rossa identifica la cappa di raffreddamento mobile con il carro e la linea marrone identifica il condotto collettore dei fumi captati verso il sistema di trattamento. . . . .	8
2	Vista dei sistemi di estrazione fumi: (a) H1: cappa di sfornamento, (b) H2: cappa di raffreddamento su carro di spegnimento. . . . .	9
3	Sketch della cappa di sfornamento. . . . .	10
4	Dimensioni significative della cappa di sfornamento. . . . .	11
5	Dominio computazionale (a) e condizioni al contorno (b) utilizzate per la modellazione della cappa di sfornamento. . . . .	12
6	Sketch della cappa di raffreddamento. . . . .	13
7	Dimensioni caratteristiche della cappa di raffreddamento. . . . .	14
8	Dominio computazionale (a) e condizioni al contorno (b) utilizzate per la modellazione della cappa di raffreddamento. . . . .	15
9	Cappa di sfornamento (H1): campo di velocità calcolato all'interno del dominio computazionale. . . . .	17
10	Variazione del campo di velocità in sezioni verticali della cappa di sfornamento (H1): sezione mediana della cappa laterale destra (a), centrale (b) e sinistra (c) e sezione frontale (d). . . . .	18
11	Cappa di sfornamento (H1): campo di pressione calcolato all'interno del dominio computazionale. . . . .	20
12	Variazione del campo di pressione in sezioni verticali della cappa di sfornamento (H1): sezione mediana della cappa laterale destra (a), centrale (b) e sinistra (c) e sezione frontale (d). . . . .	21
13	Cappa di sfornamento (H1): campo di temperatura calcolato all'interno del dominio computazionale. . . . .	22
14	Variazione del campo di temperatura in sezioni verticali della cappa di sfornamento (H1): sezione mediana della cappa laterale destra (a), centrale (b) e sinistra (c) e sezione frontale (d). . . . .	23
15	Estensione del pennacchio termico all'interno della cappa di sfornamento: la superficie rossa identifica l'isosuperficie di fluido a $T = 438\text{ K}$ . . . . .	24
16	Cappa di raffreddamento (H1): campo di velocità calcolato all'interno del dominio computazionale. . . . .	25
17	Variazione del campo di velocità in sezioni verticali della cappa di raffreddamento (H2): sezione mediana della cappa destra (a), tra le due cappe (b) e mediana della cappa sinistra (c) e sezione frontale (d). . . . .	26
18	Cappa di raffreddamento (H2): campo di pressione calcolato all'interno del dominio computazionale. . . . .	27
19	Variazione del campo di pressione in sezioni verticali della cappa di raffreddamento (H2): sezione mediana della cappa destra (a), tra le due cappe (b) e mediana della cappa sinistra (c) e sezione frontale (d). . . . .	28
20	Cappa di raffreddamento (H2): campo di temperatura calcolato all'interno del dominio computazionale. . . . .	29
21	Variazione del campo di temperatura in sezioni verticali della cappa di raffreddamento (H2): sezione mediana della cappa destra (a), tra le due cappe (b) e mediana della cappa sinistra (c) e sezione frontale (d). . . . .	30
22	Estensione del pennacchio termico all'interno della cappa di raffreddamento: la superficie rossa identifica l'isosuperficie di fluido a $T = 730\text{ K}$ . . . . .	31
23	Schema concettuale per la valutazione dell'efficienza di captazione. . . . .	32
24	Cappa di raffreddamento (H1): componente verticale di velocità in corrispondenza della sezione inferiore della cappa di aspirazione. . . . .	35



25	Cappa di sfornamento (H1): componenti di velocità nel piano orizzontale verticale in corrispondenza delle sezioni di comunicazione tra cappa di sfornamento e ambiente esterno. . . . .	36
26	Cappa di sfornamento (H1): temperatura dell'aria all'interno del sistema aspirante e in corrispondenza delle sezioni di possibile trafilamento verso l'ambiente esterno. . . . .	36
27	Cappa di raffreddamento (H2): componente verticale di velocità in corrispondenza della sezione di cappa affacciata sul carro. . . . .	37
28	Cappa di raffreddamento (H2): componenti di velocità nel piano orizzontale verticale in corrispondenza delle sezioni di comunicazione tra carro e ambiente esterno. . . . .	37
29	Cappa di raffreddamento (H2): temperatura dell'aria all'interno del sistema aspirante e in corrispondenza delle sezioni di possibile trafilamento verso l'ambiente esterno. . . . .	38

## Elenco delle tabelle

1	Condizioni di riferimento per il funzionamento della cappa di sfornamento. . . . .	12
2	Condizioni di riferimento per il funzionamento della cappa di raffreddamento. . . . .	14
3	Ripartizione dei flussi di massa e dei flussi entalpici calcolati per la cappa di sfornamento (H1). L'efficienza entalpica e la frazione estratta sono sottolineate. . . . .	33
4	Ripartizione dei flussi di massa e dei flussi entalpici calcolati per la cappa di raffreddamento (H2). L'efficienza entalpica e la frazione estratta sono sottolineate. . . . .	34

## 1 Introduzione

Lo stabilimento ILVA di Taranto è uno stabilimento a ciclo integrale che produce laminati di acciaio a partire dalle materie prime (ferro, fondenti e carbon fossile) che vengono elaborati presso lo stesso sito produttivo. L'unità produttiva dispone di batterie di forni per coke, altiforni, impianti di agglomerazione minerale, acciaierie LD, linee di colata continua e treni di laminazione, impianti per il trattamento superficiale dei prodotti (decapaggio, elettrozincatura, zincatura a caldo) e per la produzione di tubi.

Dal 3 giugno 2013, con D.L. 61/2013, ILVA S.p.A è sottoposta a commissariamento straordinario per l'attuazione del piano ambientale previsto dall'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA). Il piano prevede l'attuazione di una serie di interventi atti a contenere le emissioni diffuse generate dal funzionamento dei vari impianti.

Gli interventi di interesse per questo lavoro sono descritti nella Prescrizione n.37 dell'Autorizzazione Integrata Ambientale d'impianto, che riguarda l'impianto di produzione del coke.

La produzione del coke si realizza in cinque fasi:

1. preparazione della miscela di carbon fossile,
2. caricamento della miscela nelle batterie di forni a coke;
3. cokefazione;
4. sfornamento del coke;
5. spegnimento del coke.

Nella prima fase i carboni fossili di diversa qualità, stoccati in specifici cumuli nei parchi di stoccaggio primari, vengono prelevati e alimentati con nastri trasportatori alla zona di preparazione della miscela. Qui il carbone viene sottoposto a trattamenti di frantumazione, vagliatura, miscelazione ed umidificazione per ottenere la pezzatura adatta al caricamento nei forni della cokeria.

Il carbon fossile così preparato viene trasferito nei silos di caricamento cokeria da cui viene alimentato alla macchina caricatrice. La macchina caricatrice scorre su un binario parallelo all'asse della batteria al di sopra dei forni ed è dotata di tramogge di carica. Durante il caricamento del forno, la macchina caricatrice si posiziona con le tramogge di carica sulle bocchette di caricamento del forno da caricare, vengono sollevati magneticamente i coperchi e viene scaricato il cumulo di polvere di carbone. Un'asta spianatrice provvede a distribuire il cumulo nel vano del forno. Il forno viene quindi sigillato per avviare il processo di distillazione secca (senza contatto con l'aria) del coke.

I forni, di sezione rettangolare, sono separati l'uno dall'altro da camere di combustione parallele (piedritti) in modo da formare una batteria. Nei piedritti viene bruciato il gas di cokeria (o gas di altoforno miscelato con gas di cokeria) e il calore prodotto viene trasmesso al forno attraverso la muratura in refrattario. La durata tipica del processo di distillazione varia dalle 20 alle 22 ore.

Al termine del ciclo di distillazione, il carbon fossile, trasformato in coke metallurgico, viene estratto, ancora incandescente ( $T \simeq 1100^{\circ}\text{C}$ ), dai forni utilizzando una macchina sfornatrice ed una macchina guida coke. L'asta dalla macchina sfornatrice spinge il coke dalla cella del forno verso la guida coke che lo convoglia per lo scarico sul carro di spegnimento. Una volta caricato, il carro viene movimentato fino alla torre di spegnimento. Durante il trasporto il coke ancora incandescente si raffredda progressivamente, liberando vapori contenenti composti volatili residuali. In corrispondenza della torre di spegnimento si realizza il raffreddamento finale del coke con alimentazione di acqua e notevole sviluppo di vapore.

Ogni fase del processo di produzione del coke è caratterizzata da emissioni specifiche che sono state oggetto di analisi in fase di redazione dell'Autorizzazione Integrata Ambientale. Nello specifico, il convogliamento delle emissioni connesse alla fase di trasferimento del coke dal punto di sfornamento al punto di spegnimento nonché dalla torre di spegnimento al punto di scarico sul nastro rappresenta uno dei punti di intervento identificati per il risanamento dell'impianto ILVA di Taranto.

La Prescrizione n.37 dell'Autorizzazione Integrata Ambientale d'impianto richiede "di presentare entro 6 mesi dal rilascio del provvedimento di riesame dell'AIA, uno studio teso a valutare il convogliamento delle emissioni diffuse, oggi non convogliate, connesse alla fase di trasferimento del coke dal punto di sfornamento al punto di spegnimento, nonché dalla torre di spegnimento al punto di scarico sul nastro. Ciò al fine di intercettare le emissioni non completamente aspirate nella fase di sfornamento ovvero nel caso di non completa distillazione del coke in seguito ad anomalie nella fase di distillazione dello stesso. Inoltre, la captazione e il convogliamento di dette emissioni dovrà essere accompagnata di

idoneo sistema di abbattimento volto a garantire il rispetto dei limiti per i parametri già prescritti per la fase di sfornamento”.

I presidi di captazione fumi oggetto di questo studio sono specificamente finalizzati al contenimento delle emissioni che si generano durante le fasi di sfornamento e trasporto del coke verso la torre di spegnimento. I sistemi di captazione delle emissioni comprendono:

- un sistema di cappe aspiranti di sfornamento, fisso sulla guida coke, per aspirare la frazione di polveri e vapori che si sviluppano nella fase di sfornamento e caricamento sul carro di spegnimento; il sistema è costituito da una cappa centrale e due cappe laterali dedicate rispettivamente alla cattura delle polveri prodotte in fase di sfornamento e al contenimento dei vapori che si sprigionano dal coke una volta scaricato sul carro;
- un sistema mobile di cappe aspiranti, solidale con il carro di spegnimento, dedicato al confinamento e captazione dei vapori che si sprigionano durante l'iniziale raffreddamento del coke sul carro.

La Figura 1 mostra una vista in pianta della cokeria e la localizzazione dei presidi per la captazione dei fumi oggetto dello studio. La linea blu identifica la guida di sfornamento (coke guide) sulla quale si allinea la cappa di sfornamento (coke guide hood, evidenziata in verde). Sulla stessa linea della cappa di sfornamento è evidenziata in rosso la cappa di raffreddamento (quenching car hood). Entrambi i sistemi di captazione dei fumi sono collegati ad un unico condotto di estrazione (evidenziato in marrone) che convoglia le emissioni aspirate dalle diverse cappe verso idonei sistemi di trattamento.

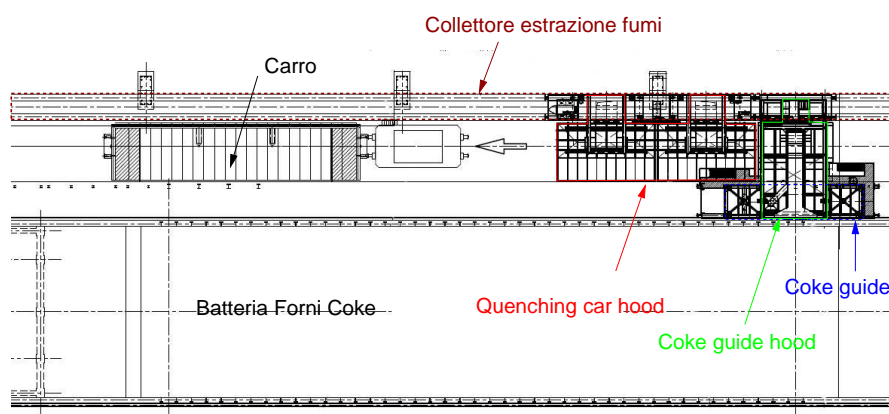


Figura 1: Mappa di una batteria di forni di cokeria. La linea blu identifica la guida di sfornamento coke; la linea verde identifica la cappa di sfornamento; la linea rossa identifica la cappa di raffreddamento mobile con il carro e la linea marrone identifica il condotto collettore dei fumi captati verso il sistema di trattamento.

L'obiettivo del lavoro è valutare, per mezzo della simulazione numerica, le prestazioni dei sistemi di captazione ed estrazione fumi progettati da OMEV. I disegni di progetto dei sistemi di captazione (configurazione geometrica, condizioni di funzionamento nominale) sono state fornite da OMEV.

Le simulazioni numeriche permetteranno di (i) stimare a priori la perdita di carico e (ii) valutare l'efficienza di captazione dei sistemi aspiranti. I sistemi di captazione esaminati sono due:

- H1: sistema di captazione “cappa di sfornamento”;
- H2: sistema di captazione “cappa di raffreddamento su carro di spegnimento”.

## 2 Geometria

In Figura 2 sono mostrati i due diversi sistemi aspiranti analizzati in questo lavoro.

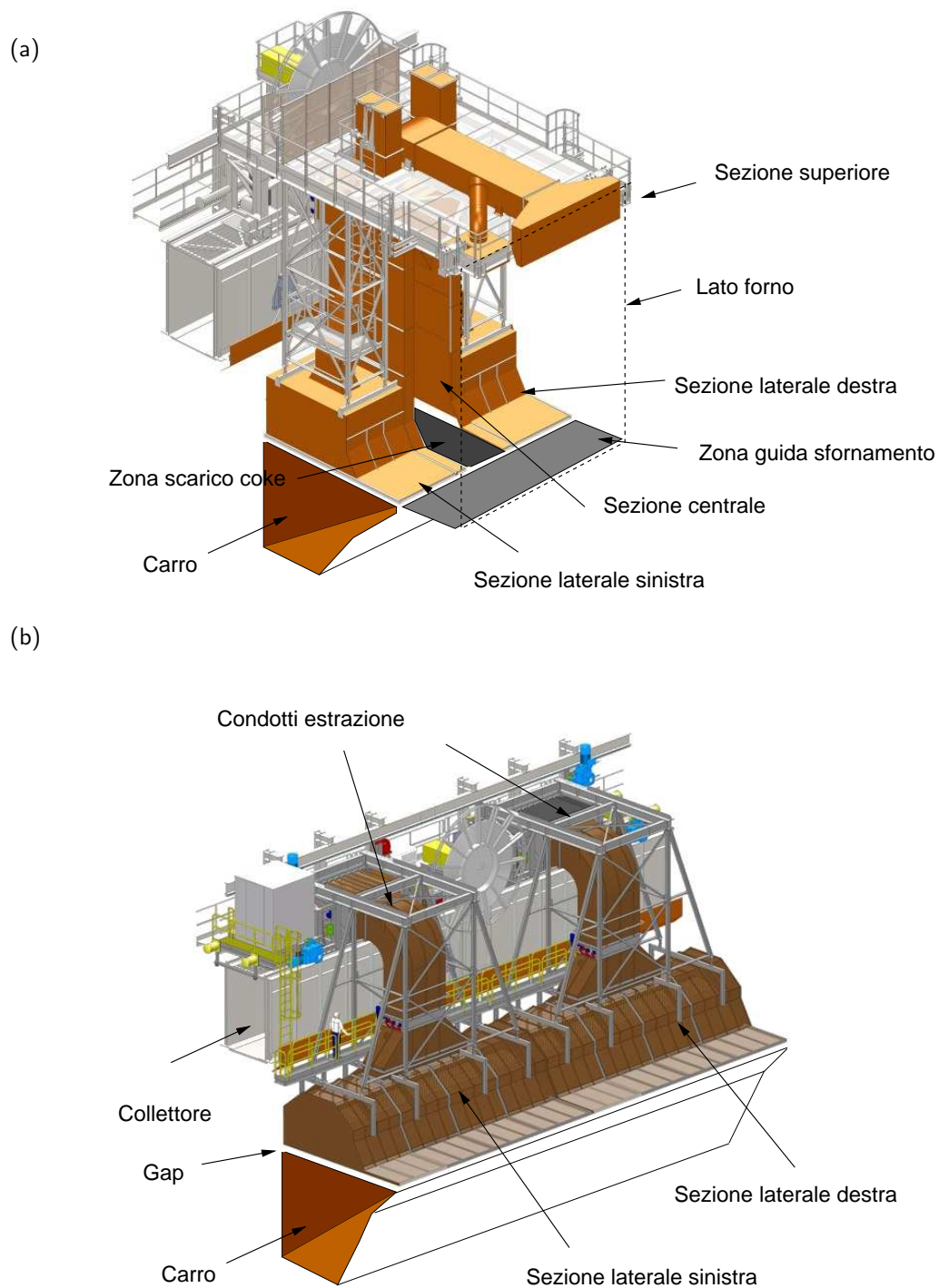


Figura 2: Vista dei sistemi di estrazione fumi: (a) H1: cappa di sfornamento, (b) H2: cappa di raffreddamento su carro di spegnimento.

## 2.1 Cappa di sfornamento

La cappa di sfornamento (Figura 2 (a)) è costituita da quattro sezioni aspiranti:

- una sezione centrale, aperta verso la guida coke per consentire lo scarico del coke dal forno nel carro;
- due sezioni laterali (destra e sinistra), aspiranti dal basso, che si affacciano sulla superficie del carro contenente il coke;
- una sezione superiore che si affaccia sulla porta del forno e permette di aspirare i fumi nella prima fase dello sfornamento.

In questo lavoro verrà considerato il funzionamento delle prime tre sezioni aspiranti (cappa centrale, laterale destra e sinistra), che garantiscono il controllo delle emissioni durante la fase di scaricamento del coke.

In Figura 3 è rappresentata schematicamente la cappa di sfornamento.

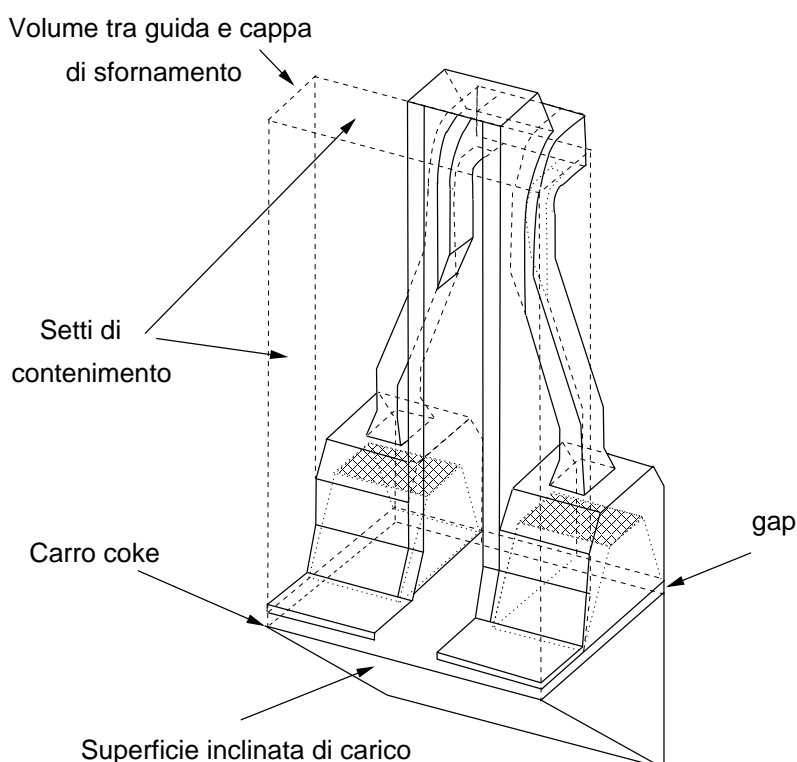


Figura 3: Sketch della cappa di sfornamento.

La sezione centrale è aperta frontalmente lungo tutta l'altezza affacciata sulla guida di sfornamento e nella faccia inferiore che si affaccia sul carro. La sezione frontale è delimitata da due lamiere a sbalzo che confinano in parte il volume di aspirazione.

Ognuna delle due cappe laterali è costituita da

1. un setto orizzontale al livello della base della guida di sfornamento coke che permette di confinare superiormente il volume del carro;
2. una cupola forata che permette il contenimento e l'accumulo temporaneo dei fumi che si sprigionano dal coke;
3. una intercapedine aspirante su due lati della cupola forata per drenare i fumi e collettarli al sistema di trattamento.

Le dimensioni caratteristiche del sistema sono indicate in Figura 4.

In condizioni operative, la cappa di sfornamento è allineata con la guida coke posizionata in corrispondenza del forno da scaricare. Il carro si sposta progressivamente sotto la cappa in modo da consentire lo scarico del coke sull'intera superficie. La cappa di sfornamento deve permettere di contenere i vapori generati principalmente dal coke sfornato.

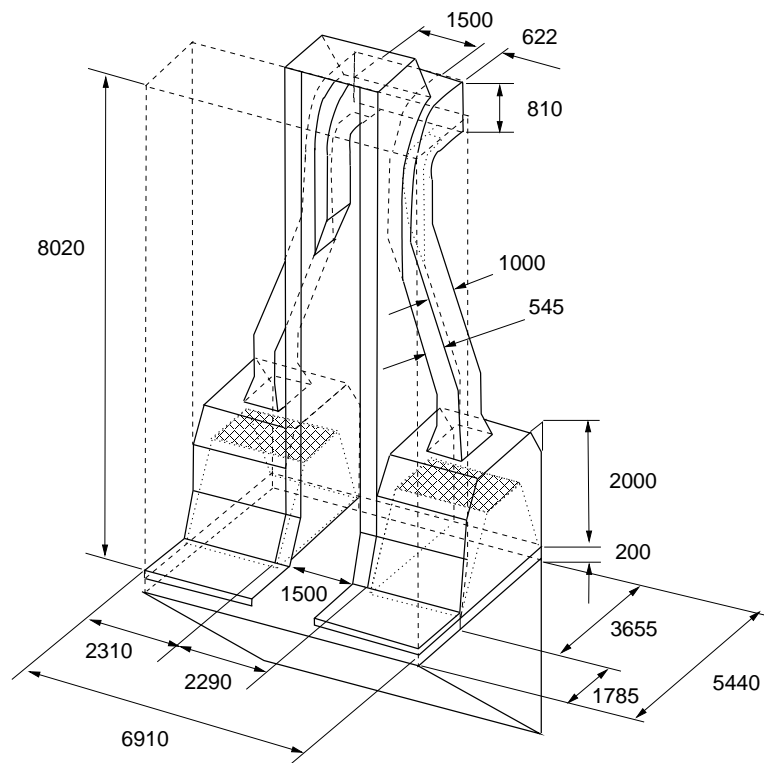


Figura 4: Dimensioni significative della cappa di sfornamento.

Per valutare le performance di captazione dei fumi del sistema, si è individuato il volume di controllo mostrato in Figura ?? (a): il volume include la cappa di sfornamento, la porzione superiore del carro coke e la parte di volume d'aria compresa tra la guida di sfornamento e la cappa di sfornamento. Quest'area è confinata lateralmente e superiormente dai setti di contenimento della guida coke, affaccia sulla guida di sfornamento da un lato ed è aperta verso l'ambiente dall'altro. Tra il carro e la cappa esiste un gap di 200 mm. La superficie inclinata del carro sulla quale viene scaricato il coke delimita inferiormente il volume di controllo.

Per la modellazione numerica il volume di controllo è stato suddiviso in volumi computazionali di piccola dimensione, per ognuno dei quali vengono risolte le equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'entalpia.

In Figura ?? (b) sono indicate le condizioni al contorno utilizzate per l'implementazione del modello:

1. portata estratta fissata in corrispondenza delle sezioni  $C_1$ ,  $C_2$  e  $D$  di collegamento della cappa con il collettore principale;
2. flusso termico generato dalla presenza del coke sulla superficie inclinata del carro ( $W_1$ );
3. sezione aperta verso l'ambiente lato guida sfornamento coke ( $F_1$ );
4. sezioni aperte verso l'ambiente lato opposto guida sfornamento coke ( $R_1$  e  $R_2$ );
5. sezioni aperte verso l'ambiente associate al gap verticale tra carro e cappa.

Tutte le altre pareti del dominio sono pareti solide, impenetrabili al flusso e adiabatiche.

In Tabella 1 sono riassunti i dati che descrivono le condizioni operative di funzionamento della cappa e le condizioni di riferimento per l'ambiente esterno.

Il valore di resistenza termica è stato calcolato considerando per il valore di conducibilità termica del coke il valore ricavato dalla seguente formula (Kasai et al., 1993)

$$k = (0.973 + 6.34 \cdot 10^{-3}(T - 273)) \left(1 - \epsilon^{2/3}\right) \quad (1)$$

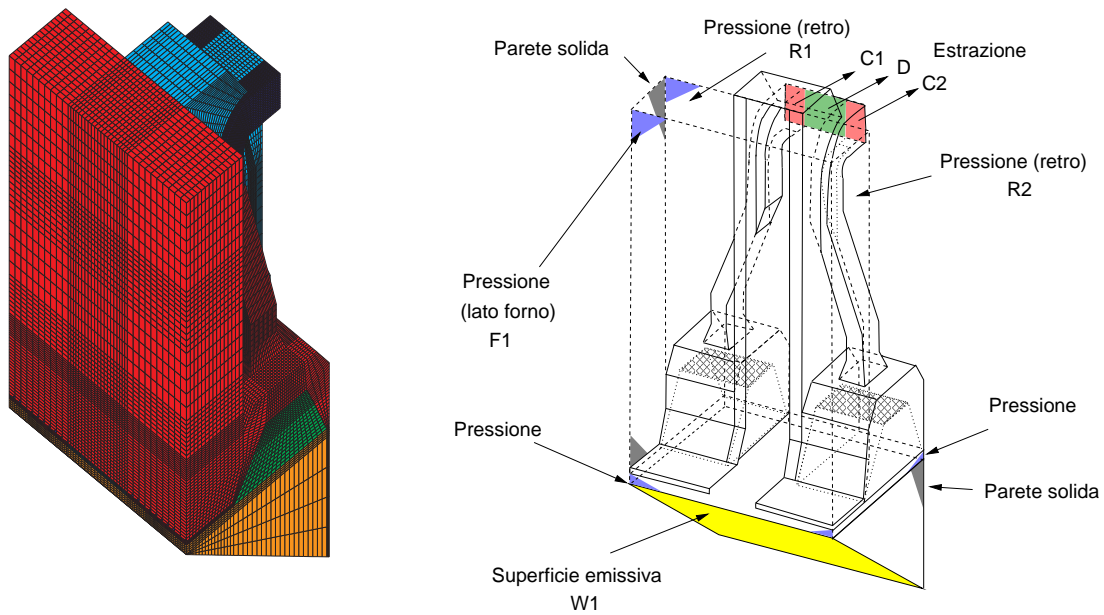


Figura 5: Dominio computazionale (a) e condizioni al contorno (b) utilizzate per la modellazione della cappa di sfornamento.

Condizioni di lavoro di riferimento			
Temperatura ambiente*	164.7°C		
Pressione ambiente	10 <sup>5</sup> Pa		
	C1	D	C <sub>2</sub>
Portata estratta (@ 164.7°C)	15,126.21 m <sup>3</sup> /h 12,050.71 kg/h	37,311.31 m <sup>3</sup> /h 29,725.08 kg/h	15,126.21 m <sup>3</sup> /h 12,050.71 kg/h
Velocità di aspirazione (@ 164.7°C)	8.50 m/s	8.53 m/s	8.50 m/s
Flusso termico			
Resistenza termica, $R$	0.034 m <sup>2</sup> K/W		
Temperatura coke, $T_{coke}$	1100°C		

\* Si assume conservativamente che la temperatura ambiente sia quella mediamente attesa per i fumi in cappa (dati SeFuDe).

Tabella 1: Condizioni di riferimento per il funzionamento della cappa di sfornamento.

dove  $k$  è la conducibilità termica, in [W/mK],  $T$  è la temperatura del coke, in [K], e  $\epsilon$  è la porosità del coke, adimensionale, assunta pari a 0.5.

La simulazione del funzionamento della cappa è stata realizzata in condizioni di stazionario, comunque conservative rispetto alle reali condizioni di funzionamento della cappa di sfornamento: l'estrazione dell'aria è stata considerata costante e l'intera superficie inclinata del carro, caricata di carbone, è stata considerata come superficie emissiva (massimo flusso termico).

## 2.2 Cappa di raffreddamento (quenching)

La cappa di raffreddamento mobile con il carro è costituita da due sezioni aspiranti perfettamente simmetriche. Le due sezioni aspiranti sono allineate lungo il carro e ne coprono l'intera lunghezza caricata di coke. Il gap verticale tra carro e cappa è di 200 mm.

In Figura 6 è rappresentata una vista schematica della cappa di raffreddamento. Le due cappe hanno profilo esterno del tutto simile alla cappa di sfornamento in modo da inserirsi senza interferire tra le apparecchiature pre-esistenti. Ognuna delle due cappe è costituita da:



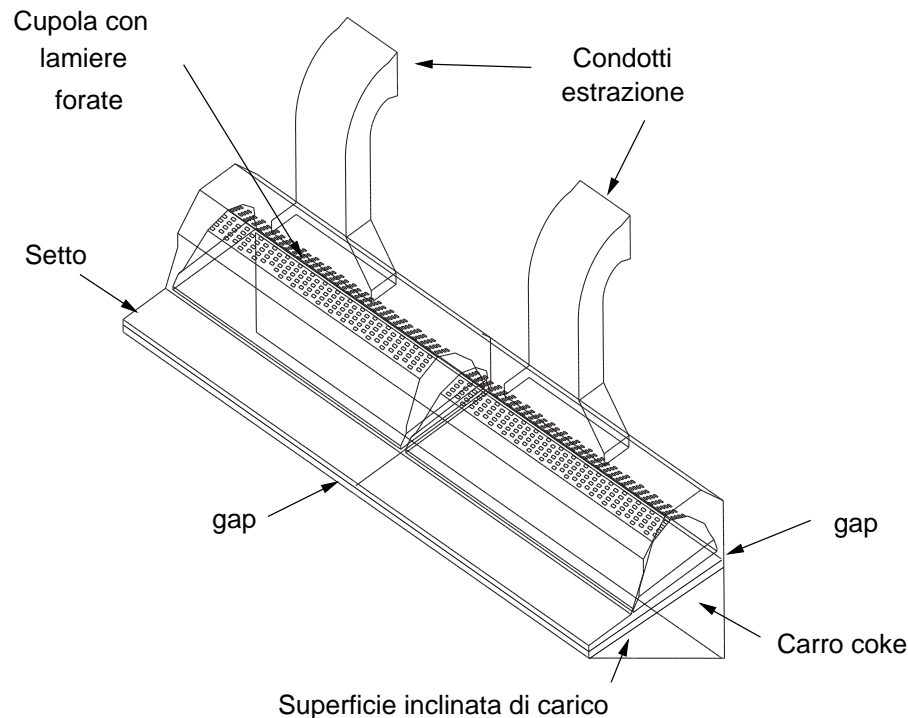


Figura 6: Sketch della cappa di raffreddamento.

1. un setto orizzontale allungato al livello della base della guida di sfornamento coke che permette di confinare superiormente il volume del carro;
2. una cupola forata che permette il contenimento e l'accumulo temporaneo dei fumi che si sprigionano dal coke;
3. una intercapedine aspirante sui quattro lati della cupola forata per drenare i fumi e collettarli al sistema di trattamento.

Le dimensioni caratteristiche del sistema sono indicate in Figura 7.

In condizioni operative, la cappa di raffreddamento è posizionata sul carro coke e si sposta solidamente con esso dal punto di sfornamento alla torre di quenching. In questa fase, la cappa di raffreddamento deve permettere di contenere i vapori generati dal coke mentre si completano le reazioni chimiche e il coke inizia a raffreddarsi.

Per valutare le performance di captazione dei fumi del sistema, si è individuato il volume di controllo mostrato in Figura 8 (a): il volume include il sistema delle due cappe di raffreddamento e la porzione superiore del carro coke. A parte il gap di verticale di 200 mm tra carro e cappa lungo tutto il perimetro del carro, quest'area è confinata da pareti solide (delle cappe e del carro). La superficie inclinata del carro sulla quale è caricato il coke delimita inferiormente il volume di controllo.

Per la modellazione numerica il volume di controllo (Figura 8 (a)) è stato suddiviso in volumi computazionali di piccola dimensione, per ognuno dei quali vengono risolte le equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'entalpia.

In Figura 8 (b) sono indicate le condizioni al contorno utilizzate per l'implementazione del modello:

1. portata estratta fissata in corrispondenza delle sezioni  $E_1$  e  $E_2$  di collegamento delle cappe con il collettore principale;
2. flusso termico generato dalla presenza del coke sulla superficie inclinata del carro ( $W_1$ );

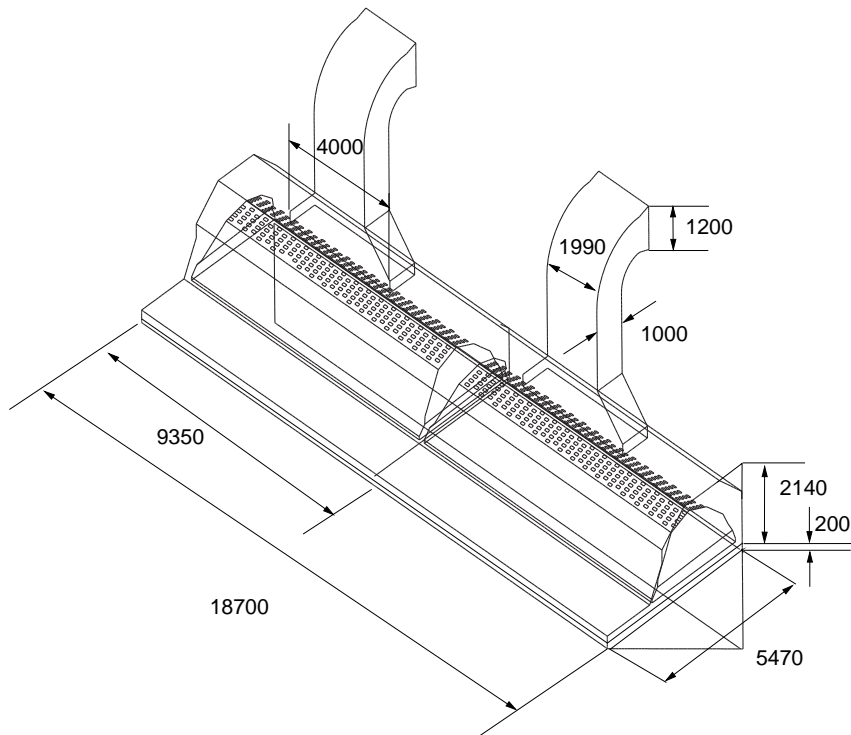


Figura 7: Dimensioni caratteristiche della cappa di raffreddamento.

3. sezioni aperte verso l'ambiente associate al gap verticale tra carro e cappa.

Tutte le altre pareti del dominio sono pareti solide, impenetrabili al flusso e adiabatiche.

In Tabella 2 sono riassunti i dati che descrivono le condizioni operative di funzionamento della cappa e le condizioni di riferimento per l'ambiente esterno.

Condizioni di lavoro di riferimento		
Temperatura ambiente*	456.15°C	
Pressione ambiente	10 <sup>5</sup> Pa	
	$E_1$	$E_2$
Portata estratta (@ 456.15°C)	42,347.92 m <sup>3</sup> /h	42,347.92 m <sup>3</sup> /h
	20,254.64 kg/h	20,254.64 kg/h
Velocità di aspirazione (@ 456.15°C)	4.85 m/s	4.85 m/s
Flusso termico		
Resistenza termica, $R$	0.034 m <sup>2</sup> K/W	
Temperatura coke, $T_{coke}$	1100°C	

\* Si assume conservativamente che la temperatura ambiente sia quella mediamente attesa per i fumi in cappa (dati SeFuDe).

Tabella 2: Condizioni di riferimento per il funzionamento della cappa di raffreddamento.

La simulazione del funzionamento della cappa è stata realizzata in condizioni di stazionario: l'estrazione dell'aria è stata considerata costante e l'intera superficie inclinata del carro, caricata di carbone, è stata considerata come superficie emissiva (massimo flusso termico).

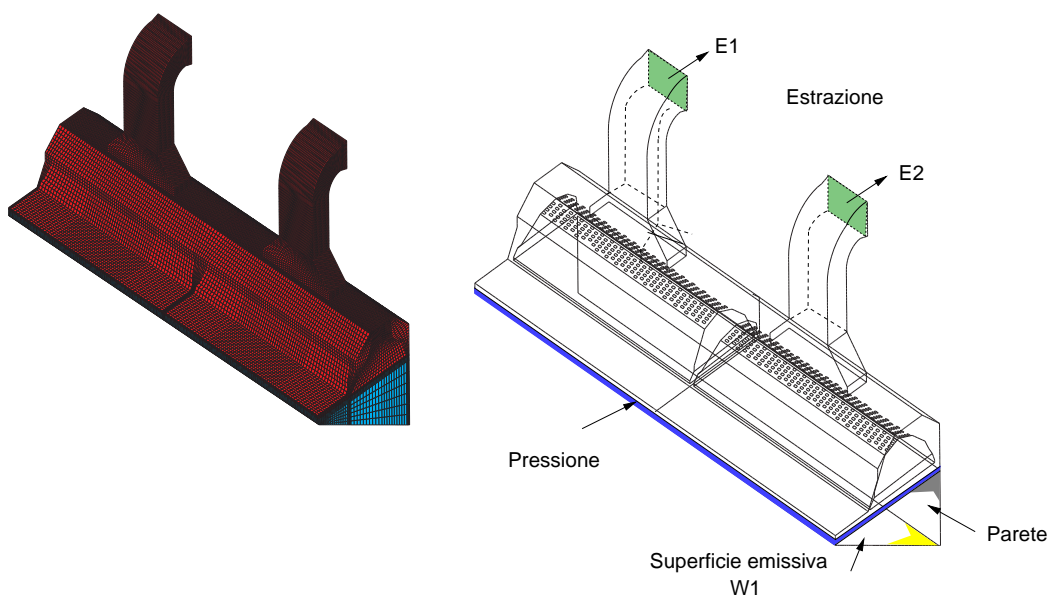


Figura 8: Dominio computazionale (a) e condizioni al contorno (b) utilizzate per la modellazione della cappa di raffreddamento.

### 3 Metodo numerico

#### 3.1 Campo di moto e campo termico

Il calore rilasciato da coke nella fase di carico sul carro e di trasporto è stato considerato la principale sorgente di emissioni in questa fase del processo di cokeria. In questo lavoro, abbiamo deciso di modellare il pennacchio di fumi come un pennacchio termico: la frazione di fluido la cui temperatura risulta superiore di una soglia ( $1.5^{\circ}C$ ) alla temperatura ambiente sarà considerata come fumo. Per valutare l'efficienza di captazione ed estrazione dei fumi abbiamo bisogno di simulare in modo accurato il campo di moto e termico per l'aria contenuta all'interno del volume di controllo. Il volume di controllo è delimitato da tre tipi di superfici: (i) superfici che sono aperte al trascinarsi di aria ambiente (a temperatura e pressione dell'ambiente esterno), (ii) superfici solide (pareti delle cappe, del carro) e (iii) le superfici di estrazione dei fumi del sistema, dalle quali l'aria viene estratta ad una portata prefissata. Le superfici solide sono considerate adiabatiche. Solo per la superficie solida inclinata del carro (W1) sulla quale viene caricato il coke è definito un flusso termico.

Il flusso termico specifico emesso dal coke è calcolato come:

$$d\dot{q} = \frac{T_{coke}h - T_{nw}}{R} \quad [W/m^2] \quad (2)$$

dove  $d\dot{q}$  è il flusso termico emesso per unità di superficie,  $T_{coke}$  è la temperatura del coke,  $T_{nw}$  è la temperatura dell'aria in prossimità della superficie emissiva, e  $R$  è la resistenza termica. Il flusso emesso è quindi definito in base alla differenza di temperatura locale tra il coke e l'aria sovrastante.

Per entrambe le simulazioni la superficie emissiva coincide con la superficie inclinata del carro. In prossimità della superficie emissiva, il campo di moto è controllato dagli effetti di galleggiamento (convezione naturale); man mano che l'aria si sposta entro le cappe, il campo di moto è controllato dalla pressione di aspirazione (convezione forzata). La pressione di aspirazione che si realizza in corrispondenza della sezione di estrazione dei fumi è calcolata dalla simulazione in funzione del valore fissato di portata dei fumi.

Il campo di moto e il campo termico sono calcolati numericamente in ogni punto del dominio computazionale utilizzando un solutore ai volumi finiti delle equazioni di Navier-Stokes. Le equazioni risolte dal codice sono l'equazione di continuità, la conservazione della quantità di moto e la conservazione

dell'entalpia. La variazione di pressione entro il domino è piccola e quindi sono contenute anche le variazioni di densità dell'aria indotte dalla variazione di pressione; l'aria è quindi considerata come un gas ideale la cui densità cambia solo in funzione della temperatura.

Il trasferimento di calore dal coke all'aria è considerato la componente più significativa di scambio termico; tutti gli altri contributi al trasferimento di calore (scambio radiativo, flusso di calore tra fluido e pareti) sono stati trascurati.

Gli effetti della turbolenza sono stati modellati utilizzando un modello  $k - \epsilon$  a due equazioni (High Reynolds number) con funzioni di parete (wall functions) di tipo standard.

## 4 Analisi del funzionamento della cappa di sfornamento

### 4.1 Campo di moto

Il campo di moto nel dominio computazionale utilizzato per analizzare le prestazioni della cappa di sfornamento è rappresentato in Figura 9. I valori di velocità più elevati ( $13 \text{ m/s}$ ) si rilevano in corrispondenza dell'imbocco della curva che porta il flusso alla sezione di estrazione della cappa. La velocità del flusso all'interno della porzione inferiore della cappa è intorno a  $1 \text{ m/s}$ . In Figura 10 (a-c) sono mostrati gli isocontorni di velocità valutati in corrispondenza di tre sezioni verticali situate rispettivamente al centro della cappa laterale destra, della cappa centrale e della cappa laterale sinistra. In Figura 10 (d) sono mostrati gli isocontorni di velocità valutati in corrispondenza della sezione verticale frontale mediana che passa attraverso i condotti verticali delle cappe laterali. La scala di colori identifica valori di velocità compresi tra 0 e  $8.5 \text{ m/s}$ .

Si osserva che il campo di moto è simmetrico nelle due cappe laterali. Le zone a bassa velocità del flusso sono concentrate all'interno della cupola nelle cappe laterali ed in prossimità del lato esterno del carro nellacappa centrale. Dalla vista frontale si vede che zone a bassa velocità sono anche presenti ai bordi della cappa centrale.

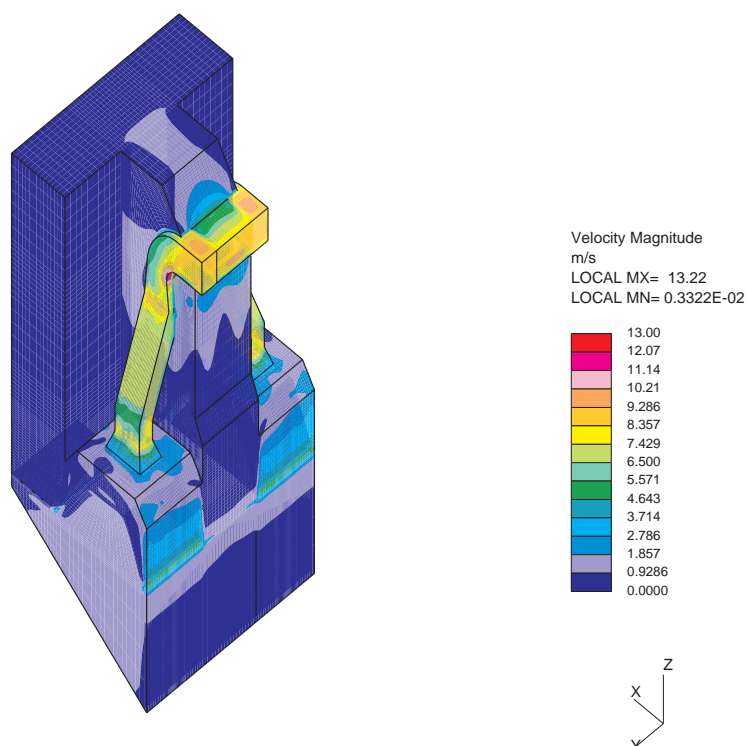


Figura 9: Cappa di sfornamento (H1): campo di velocità calcolato all'interno del dominio computazionale.

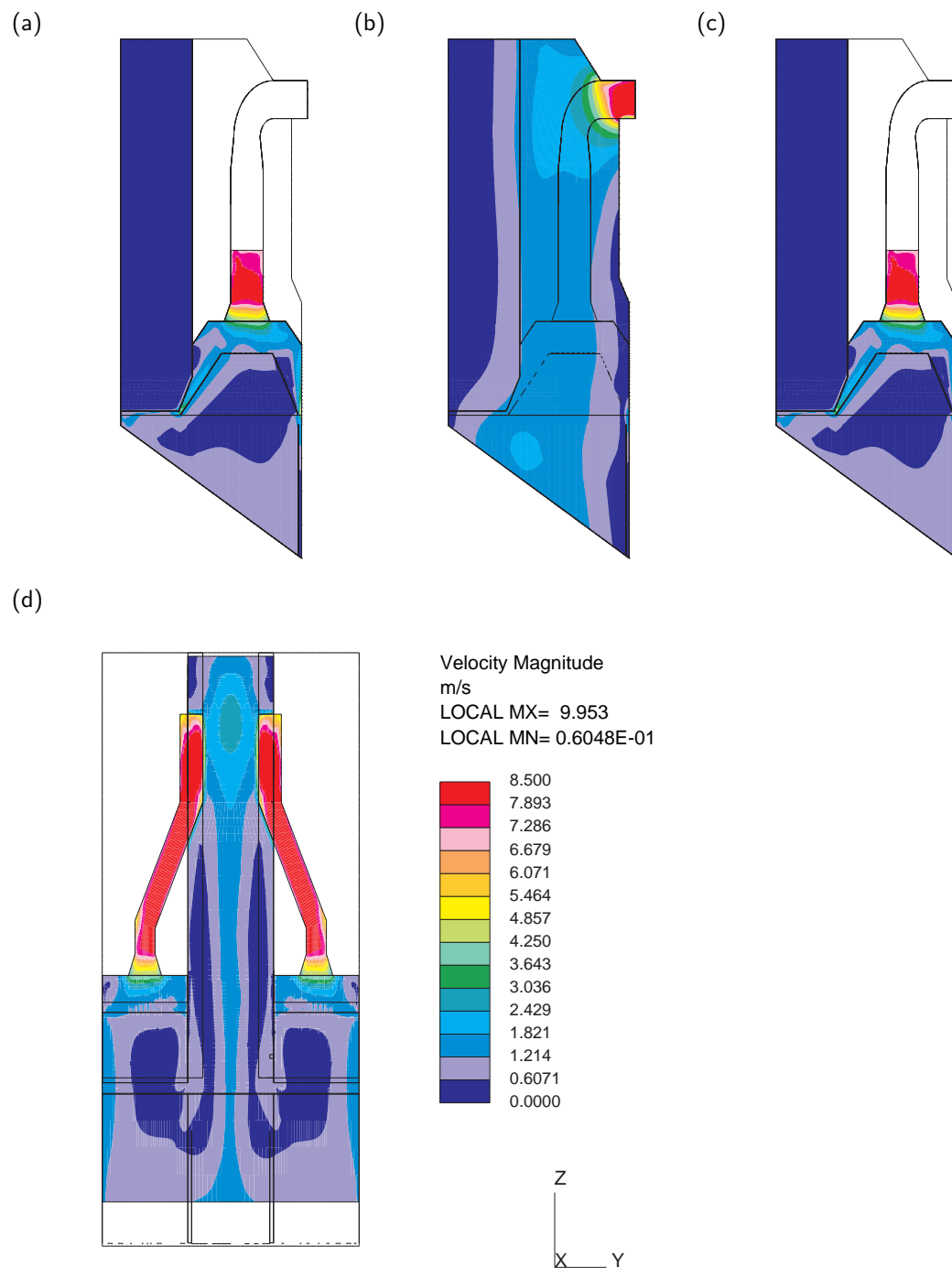


Figura 10: Variazione del campo di velocità in sezioni verticali della cappa di sfornamento (H1): sezione mediana della cappa laterale destra (a), centrale (b) e sinistra (c) e sezione frontale (d).

## 4.2 Campo di pressione

La distribuzione delle pressioni all'interno del dominio computazionale utilizzato per analizzare le prestazioni della cappa di sfornamento è rappresentato in Figura 11. I valori rappresentano la pressione relativa rispetto all'ambiente. Il sistema di estrazione genera una depressione all'interno del volume della cappa che ha lo scopo di favorire la captazione e l'accumulo dei fumi emessi dal coke. Il valore di pressione più elevato ( $0 \text{ Pa}$ ) è infatti associato alle aree in comunicazione con l'ambiente esterno (il volume del carro, l'area compresa tra guida coke e cappa di sfornamento e la porzione centrale della cappa). La pressione scende di una decina di  $\text{Pa}$  nel volume superiore delle cappe laterali, delimitato dalle intercapedini inferiori di aspirazione e la cupola forata, e decresce progressivamente lungo i condotti verticali di estrazione fino alla sezione di collettamento sul condotto principale. I valori minimi di pressione si rilevano nelle cappe laterali, in corrispondenza del lato interno del condotto curvo, dove il flusso si distacca dalla parete. In corrispondenza delle diverse porzioni (C1, D e C2) della sezione di estrazione, i valori di pressione risultano compresi tra  $-40$  e  $-80 \text{ Pa}$ , con valori più bassi in corrispondenza delle estrazioni laterali.

In Figura 12 (a-c) sono mostrati gli isocontorni di pressione valutati in corrispondenza delle tre sezioni verticali situate rispettivamente al centro della cappa laterale destra, della cappa centrale e della cappa laterale sinistra. In Figura 12 (d) sono mostrati gli isocontorni di pressione valutati in corrispondenza della sezione verticale frontale mediana che passa attraverso i condotti verticali delle cappe laterali. La scala di colori identifica valori di pressione compresi tra  $0$  e  $-70 \text{ Pa}$ .

Si osserva che il campo di pressione è simmetrico nelle due cappe laterali. La perdita di carico associata all'aspirazione del flusso attraverso le due intercapedini (frontale e posteriore) è maggiore per l'intercapedine frontale. Nella cappa centrale, la pressione risulta pressoché uniforme nell'intero volume, eccetto la zona più prossima alla sezione di estrazione, dove si concentra la variazione di pressione e si evidenzia un minimo sul lato interno della curva. Dalla vista frontale si vede che la massima perdita di carico si ha lungo il condotto verticale di estrazione dalle cappe laterali.

La perdita di carico calcolata per questa configurazione di cappa, valutata come differenza tra la media dei valori di pressione calcolati sulle sezioni di ingresso e di uscita del fluido, risulta essere pari a  $\Delta p_{lat} = 72 \text{ Pa} = 7.2 \text{ mm H}_2\text{O}$  e  $\Delta p_{cent} = 58 \text{ Pa} = 5.8 \text{ mm H}_2\text{O}$ .

## 4.3 Campo di temperatura

La distribuzione della temperatura all'interno del dominio computazionale utilizzato per analizzare le prestazioni della cappa di sfornamento è rappresentato in Figura 13. La temperatura del fluido risulta compresa tra  $437 \text{ K}$  (la temperatura assunta per l'ambiente) e  $1308 \text{ K}$  (valore inferiore alla temperatura fissata per la superficie emissiva,  $1100^\circ\text{C}$ ). La scala dei colori utilizzata è ridotta all'intervallo di temperatura compreso tra  $437$  e  $500 \text{ K}$  in modo da evidenziare i gradienti termici esistenti nel fluido. Il massimo gradiente termico è rilevabile in corrispondenza della parete emissiva. Variazioni di temperatura sono anche osservabili all'interno delle cappe laterali, con fluido più caldo che tende ad accumularsi all'interno della cupola forata.

In Figura 14 (a-c) sono mostrati gli isocontorni di temperatura valutati in corrispondenza delle tre sezioni verticali situate rispettivamente al centro della cappa laterale destra, della cappa centrale e della cappa laterale sinistra. In Figura 14 (d) sono mostrati gli isocontorni di temperatura valutati in corrispondenza della sezione verticale frontale mediana che passa attraverso i condotti verticali delle cappe laterali. La scala di colori utilizzata è la stessa della figura precedente ( $[437 \div 500 \text{ K}]$ ). La Figura evidenzia che il pennacchio termico è decisamente più sviluppato nelle cappe laterali che nella cappa centrale. In particolare, la temperatura è mediamente più alta per il flusso aspirato attraverso l'intercapedine frontale (più vicina alla superficie emissiva) piuttosto che per quello aspirato dall'intercapedine posteriore.

Considerando la distribuzione della temperatura all'interno della cappa di sfornamento e nel volume compreso tra cappa di sfornamento e guida coke, è evidente che le emissioni di calore (e fumi) sono efficacemente catturate dal sistema di estrazione. Per evidenziare l'estensione del pennacchio termico associato all'emissione del coke, in Figura 15 si è tracciata la superficie del volume di fluido che si trova a temperatura maggiore di un grado rispetto alla temperatura ambiente ( $438 \text{ K}$ ). Questa superficie

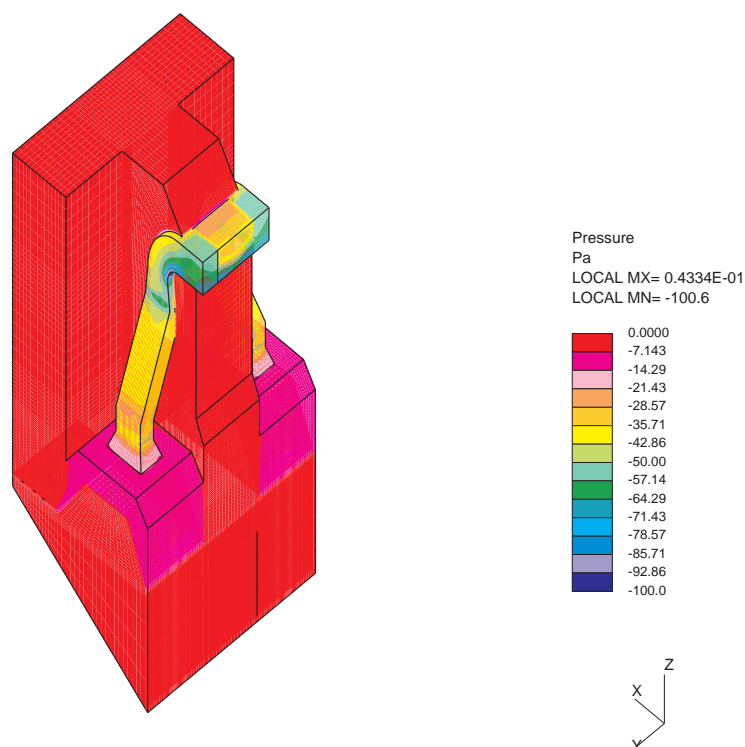


Figura 11: Cappa di sfornamento (H1): campo di pressione calcolato all'interno del dominio computazionale.

identifica in modo conservativo il volume di aria che, essendo più caldo dell'aria ambiente, è stato influenzato dalla presenza della sorgente emissiva.

Dalla Figura 15 è evidente che le uniche zone a temperatura superiore della temperatura ambiente sono confinate all'interno del carro e nel volume della cappa. In particolare, il pennacchio termico riempie le cappe laterali ed è confinato ai lati della cappa centrale nella zona protetta dai setti verticali.



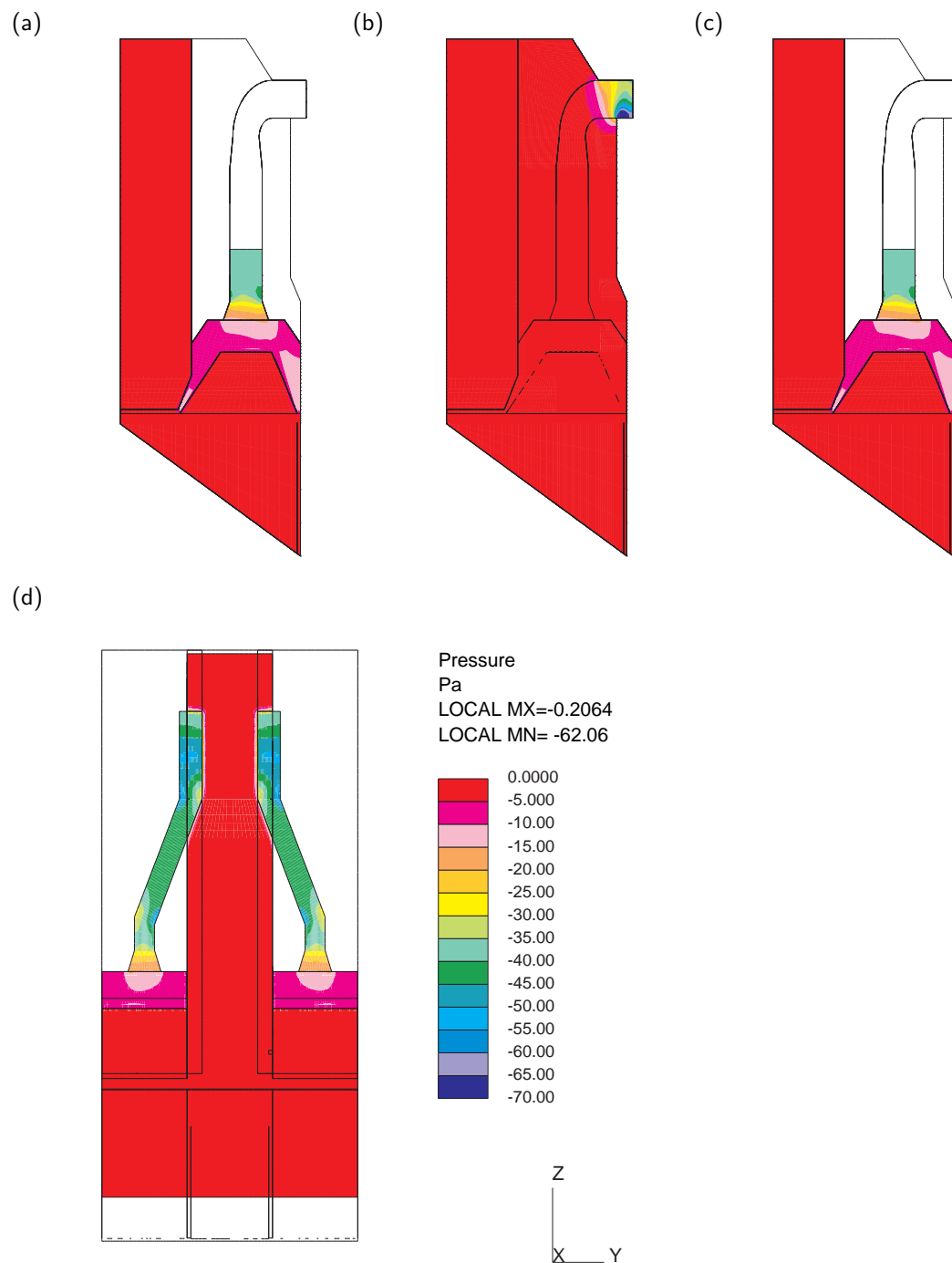


Figura 12: Variazione del campo di pressione in sezioni verticali della cappa di sfornamento (H1): sezione mediana della cappa laterale destra (a), centrale (b) e sinistra (c) e sezione frontale (d).

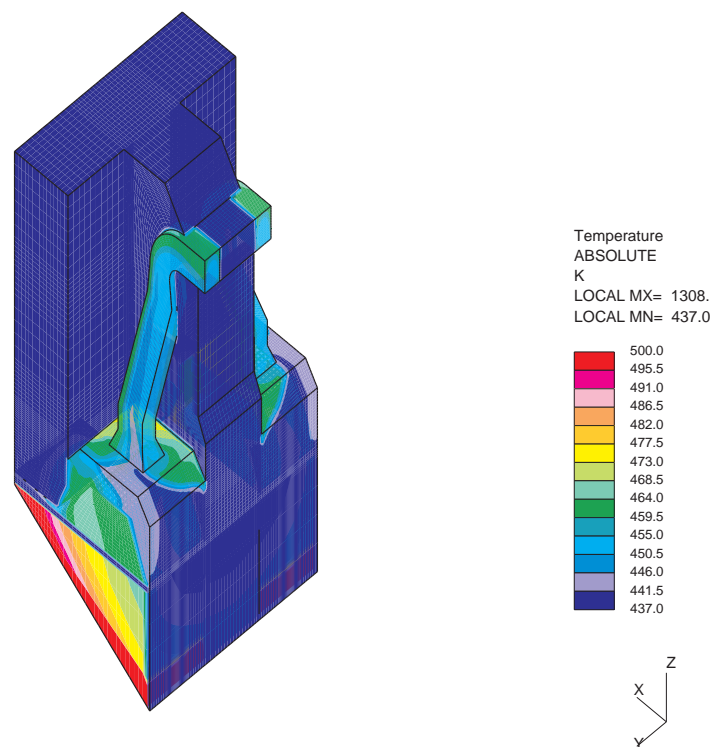


Figura 13: Cappa di sfornamento (H1): campo di temperatura calcolato all'interno del dominio computazionale.

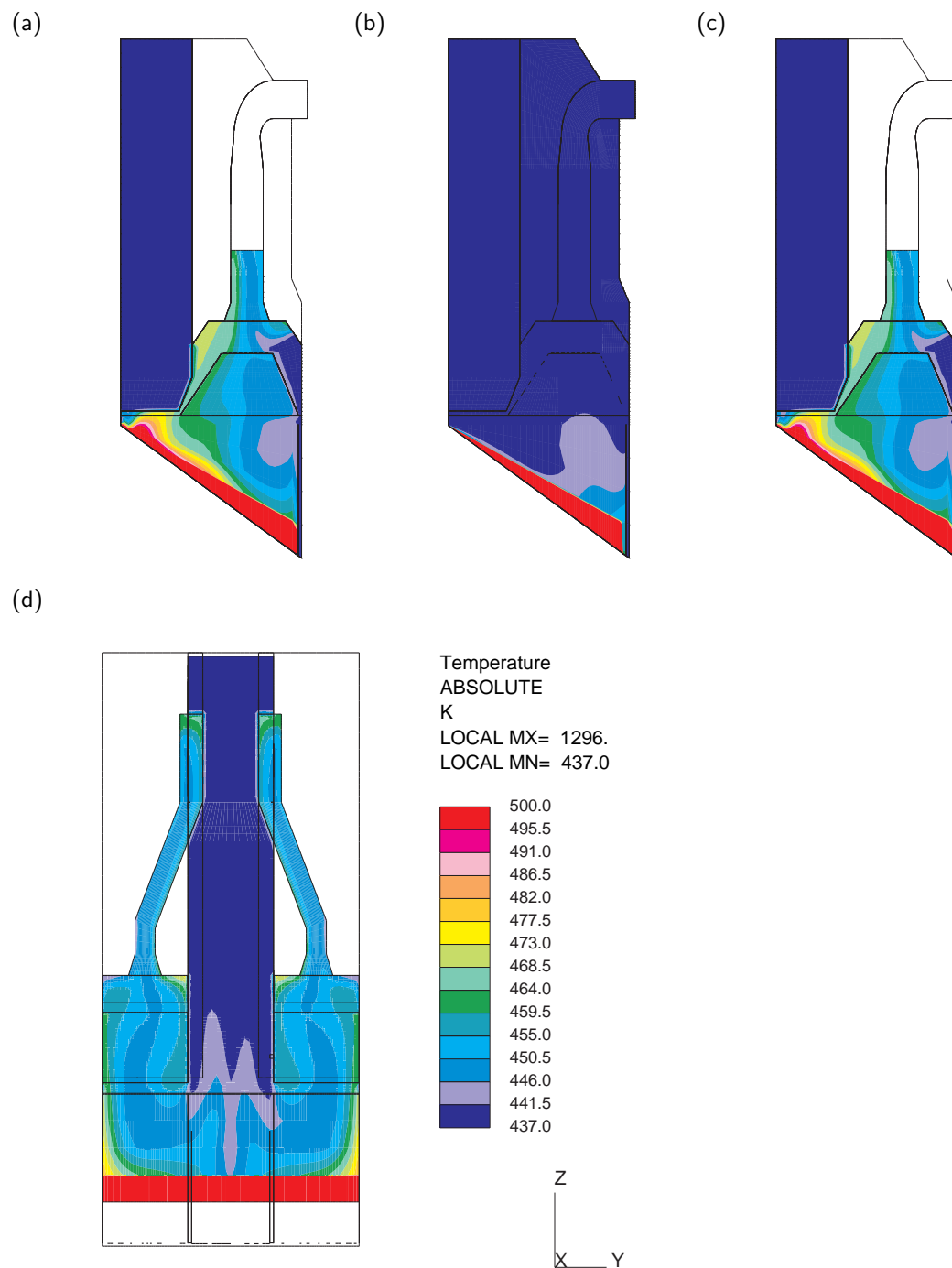


Figura 14: Variazione del campo di temperatura in sezioni verticali della cappa di sfornamento (H1): sezione mediana della cappa laterale destra (a), centrale (b) e sinistra (c) e sezione frontale (d).

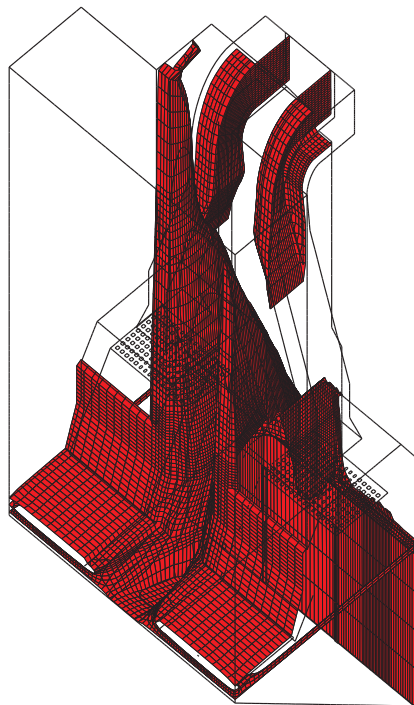


Figura 15: Estensione del pennacchio termico all'interno della cappa di sfornamento: la superficie rossa identifica l'isosuperficie di fluido a  $T = 438\text{ K}$ .

## 5 Analisi del funzionamento della cappa di raffreddamento

### 5.1 Campo di moto

Il campo di moto nel dominio computazionale definito per analizzare le prestazioni della cappa di raffreddamento è rappresentato in Figura 16. I valori di velocità più elevati ( $10 \text{ m/s}$ ) si rilevano in corrispondenza dell'intercapedine tra carro e cappa. La velocità del flusso all'interno della porzione inferiore della cappa è intorno ai  $2 \text{ m/s}$ . In Figura 17 (a-c) sono mostrati gli isocontorni di velocità valutati in corrispondenza di tre sezioni verticali situate rispettivamente al centro della cappa laterale destra, tra le cappe e al centro della cappa laterale sinistra. In Figura 17 (d) sono mostrati gli isocontorni di velocità valutati in corrispondenza della sezione verticale frontale mediana che passa attraverso i condotti verticali di estrazione delle due cappe. La scala di colori identifica valori di velocità compresi tra 0 e  $10 \text{ m/s}$ .

Si osserva che il campo di moto è simmetrico nelle due cappe. Le zone a bassa velocità del flusso sono concentrate al centro della cupola. Il massimo di velocità si ha in corrispondenza dell'intercapedine di aspirazione tra involucro esterno e cupola forata. La velocità aumenta anche all'imbocco del condotto verticale di estrazione dei fumi. Dalla vista frontale si vede che zone a bassa velocità sono presenti nel carro e sotto la porzione centrale delle cupole forate.

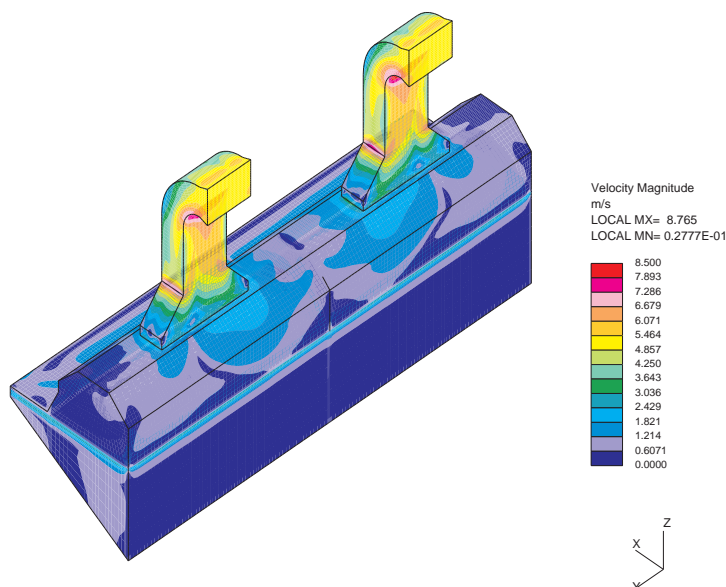


Figura 16: Cappa di raffreddamento (H1): campo di velocità calcolato all'interno del dominio computazionale.

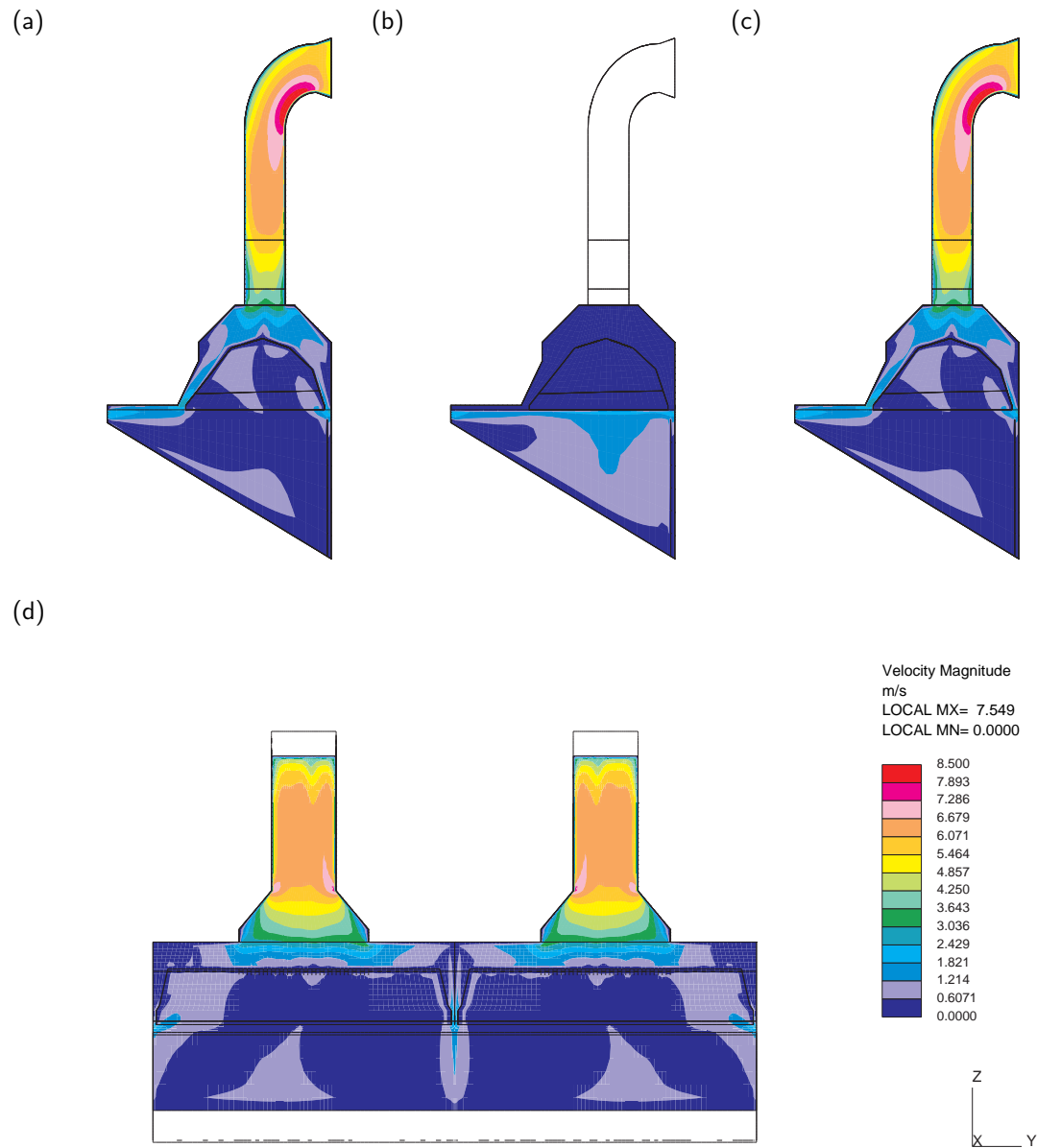


Figura 17: Variazione del campo di velocità in sezioni verticali della cappa di raffreddamento (H2): sezione mediana della cappa destra (a), tra le due cappe (b) e mediana della cappa sinistra (c) e sezione frontale (d).

## 5.2 Campo di pressione

La distribuzione delle pressioni all'interno del dominio computazionale utilizzato per analizzare le prestazioni della cappa di raffreddamento è rappresentato in Figura 18. I valori rappresentano la pressione relativa rispetto all'ambiente. Anche in questo caso, il sistema di estrazione genera una depressione all'interno del volume della cappa che ha lo scopo di favorire la captazione e l'accumulo dei fumi emessi dal coke. Il valore di pressione più elevato ( $0 \text{ Pa}$ ) risulta associato alle aree in comunicazione con l'ambiente esterno (la superficie del dominio esterna rispetto alla parete del carro). La pressione scende di una ventina di  $\text{Pa}$  nel volume del carro e nella porzione inferiore delle cappe, e scende ulteriormente muovendosi lungo i condotti di estrazione verticali. I valori minimi di pressione si rilevano in corrispondenza dell'imbocco del conotto di estrazione verticale e in corrispondenza del lato interno del condotto curvo, dove il flusso si distacca dalla parete.

In Figura 19 (a-c) sono mostrati gli isocontorni di pressione valutati in corrispondenza delle tre sezioni verticali situate rispettivamente al centro della cappa laterale destra, tra le due cappe e al centro della cappa laterale sinistra. In Figura 19 (d) sono mostrati gli isocontorni di pressione valutati in corrispondenza della sezione verticale frontale mediana che passa attraverso i condotti verticali delle cappe. La scala di colori identifica valori di pressione compresi tra  $0$  e  $-50 \text{ Pa}$ .

Si osserva che il campo di pressione è simmetrico nelle due cappe laterali. La perdita di carico associata all'aspirazione del flusso attraverso le due intercapedini (frontale e posteriore) è in questo caso maggiore per l'intercapedine posteriore. Nella sezione centrale, il fluido ha una pressione prossima a quella ambiente nella zona sotto il setto che confina il volume del carro e vicino alla parete esterna del carro, e diminuisce progressivamente spostandosi sotto l'intercapedine aspirante delle due cappe. Dalla vista frontale si vede che la massima perdita di carico si ha lungo il condotto verticale di estrazione dalle due cappe.

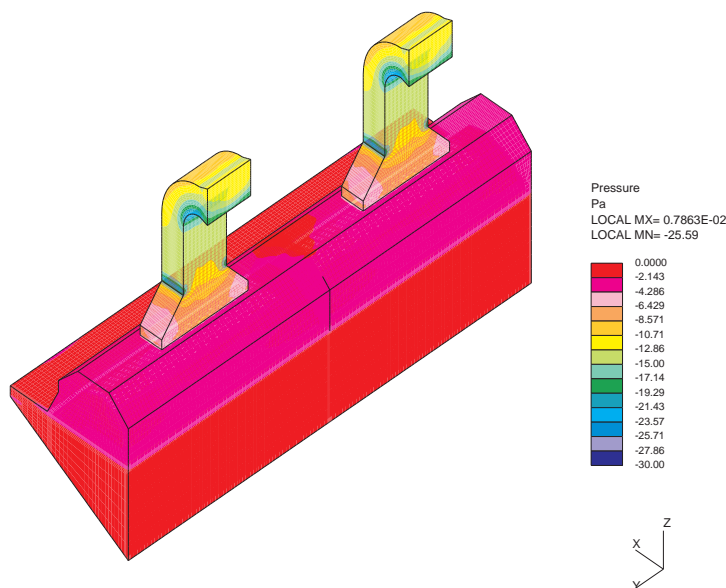


Figura 18: Cappa di raffreddamento (H2): campo di pressione calcolato all'interno del dominio computazionale.

La perdita di carico calcolata per questa configurazione di cappa, valutata come differenza tra la media dei valori di pressione calcolati sulle sezioni di ingresso e di uscita del fluido, risulta essere pari a  $\Delta p_{lat} = 67 \text{ Pa} = 6.7 \text{ mm H}_2\text{O}$

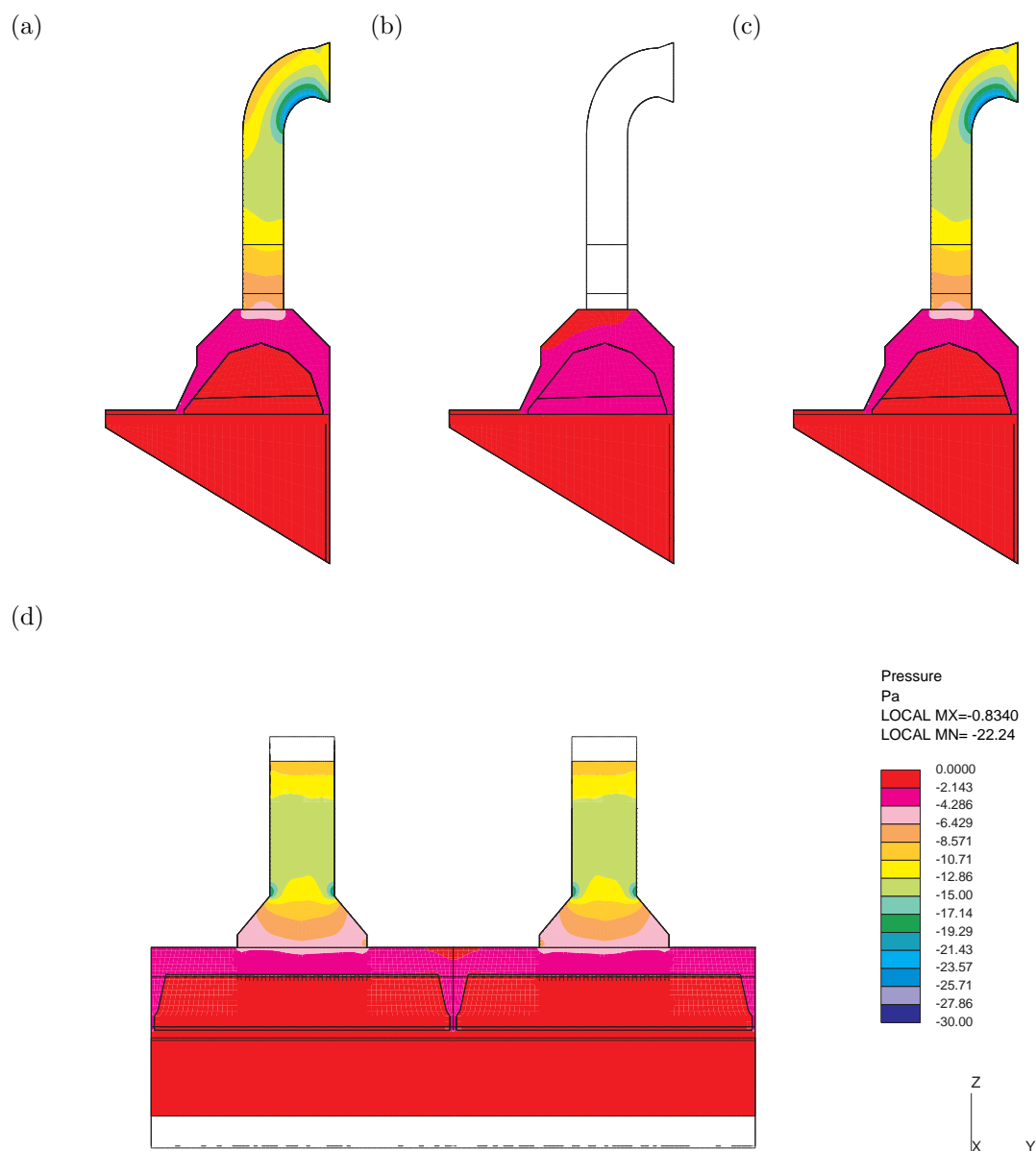


Figura 19: Variazione del campo di pressione in sezioni verticali della cappa di raffreddamento (H2): sezione mediana della cappa destra (a), tra le due cappe (b) e mediana della cappa sinistra (c) e sezione frontale (d).

### 5.3 Campo di temperatura

La distribuzione della temperatura all'interno del dominio computazionale utilizzato per analizzare le prestazioni della cappa di raffreddamento è rappresentato in Figura 20. La temperatura del fluido risulta compresa tra  $729\text{ K}$  (la temperatura assunta per l'ambiente) e  $1350\text{ K}$  (valore inferiore alla temperatura fissata per la superficie emissiva,  $1100^\circ\text{C}$ ). La scala dei colori utilizzata è ridotta all'intervallo di temperatura compreso tra  $729$  e  $850\text{ K}$  in modo da evidenziare i gradienti termici esistenti nel fluido. Il massimo gradiente termico è rilevabile in corrispondenza della parete emissiva. Variazioni di temperatura sono anche osservabili all'interno dei condotti di estrazione e della porzione centrale del dominio.



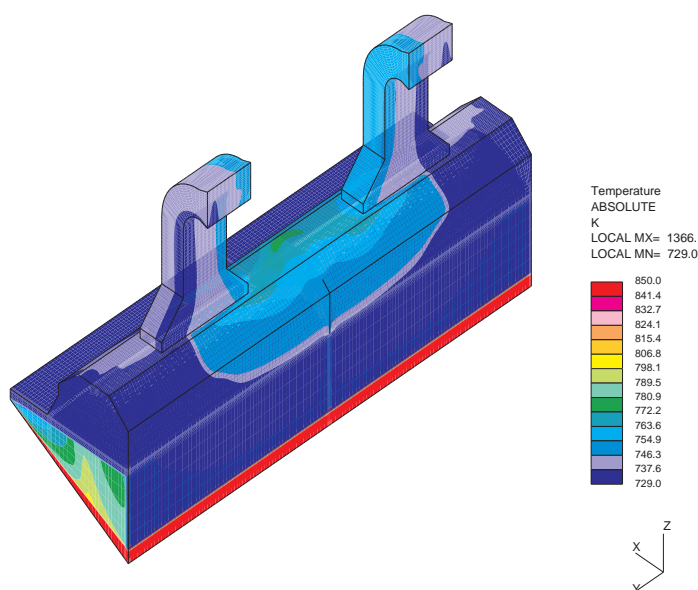


Figura 20: Cappa di raffreddamento (H2): campo di temperatura calcolato all'interno del dominio computazionale.

In Figura 21 (a-c) sono mostrati gli isocontorni di temperatura valutati in corrispondenza delle tre sezioni verticali situate rispettivamente al centro della cappa destra, tra le due cappe e al centro della cappa sinistra. In Figura 21 (d) sono mostrati gli isocontorni di temperatura valutati in corrispondenza della sezione verticale frontale mediana che passa attraverso i condotti verticali di estrazione delle cappe. La scala di colori utilizzata è la stessa della figura precedente ( $[729 \div 850 \text{ K}]$ ). La Figura evidenzia che il pennacchio termico è decisamente più sviluppato al centro delle cappe piuttosto che tra le due cappe. In particolare, la temperatura è mediamente più alta per il flusso aspirato attraverso l'intercapedine frontale (più vicina alla superficie emissiva) piuttosto che per quello aspirato dall'intercapedine posteriore.

Considerando la distribuzione della temperatura all'interno della cappa di raffreddamento, è evidente che le emissioni di calore (e fumi) sono efficacemente catturate dal sistema di estrazione. Per evidenziare l'estensione del pennacchio termico associato all'emissione del coke, in Figura 22 si è tracciata la superficie del volume di fluido che si trova a temperatura maggiore di un grado rispetto alla temperatura ambiente ( $730 \text{ K}$ ). Questa superficie identifica in modo conservativo il volume di aria che, essendo più caldo dell'aria ambiente, è stato influenzato dalla presenza della sorgente emissiva.

Dalla Figura 22 è evidente che le uniche zone a temperatura superiore della temperatura ambiente sono confinate all'interno del carro e nel volume della cappa.

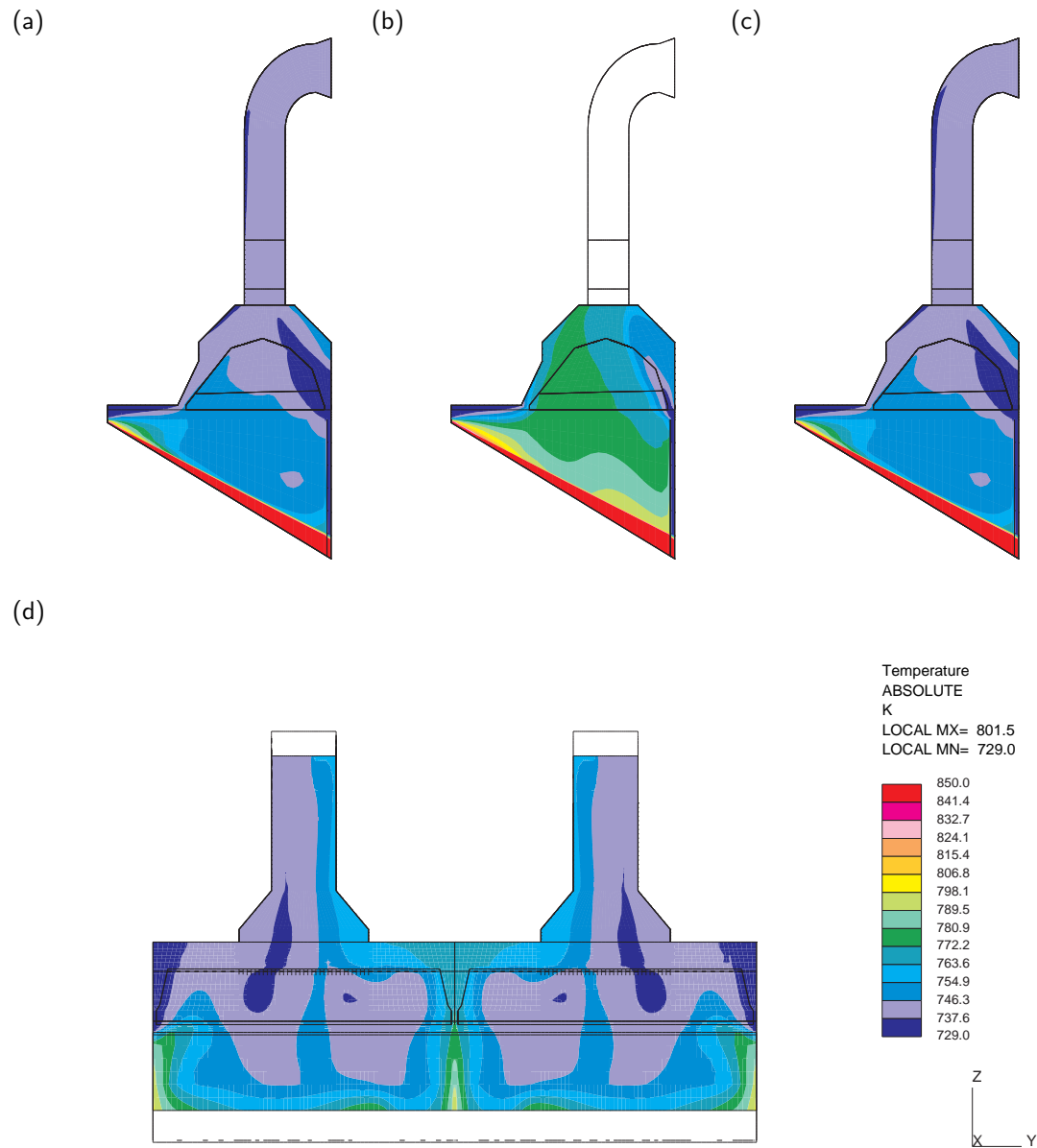


Figura 21: Variazione del campo di temperatura in sezioni verticali della cappa di raffreddamento (H2): sezione mediana della cappa destra (a), tra le due cappe (b) e mediana della cappa sinistra (c) e sezione frontale (d).

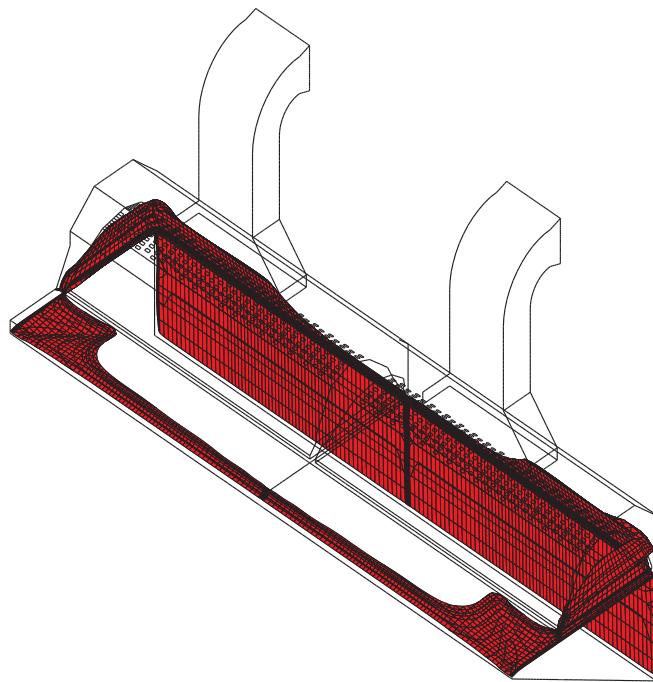


Figura 22: Estensione del pennacchio termico all'interno della cappa di raffreddamento: la superficie rossa identifica l'isosuperficie di fluido a  $T = 730\text{ K}$ .

## 6 Valutazione delle prestazioni di funzionamento dei sistemi di captazione fumi

L'efficienza di captazione è stata quantificata per i due sistemi di estrazione fumi facendo riferimento allo schema concettuale rappresentato in Figura 23.

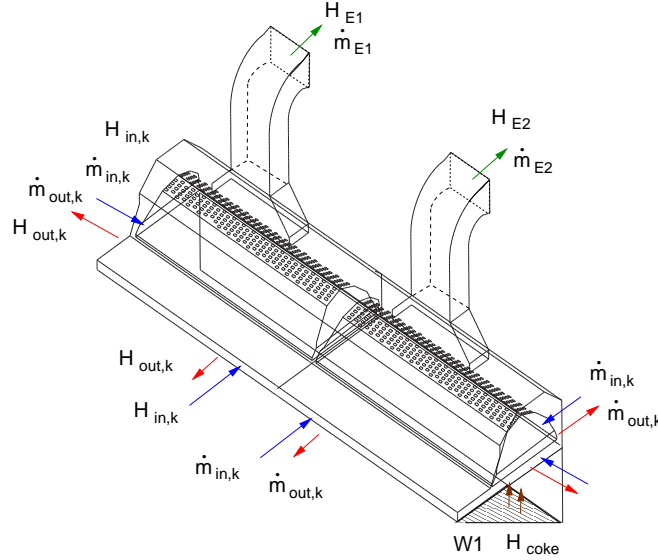


Figura 23: Schema concettuale per la valutazione dell'efficienza di captazione.

Considerando condizioni di funzionamento di stazionario, è possibile definire flussi entranti (freccie blu) e uscenti (freccie rosse) da ognuna delle superfici che delimitano il volume di controllo. In particolare per ogni superficie si può valutare la massa entrante/uscente,  $\dot{m}_{in,k}$  e  $\dot{m}_{out,k}$ , e il flusso entalpico associato,  $H_{in,k}$  e  $H_{out,k}$ .

Se la cappa non è operativa, il flusso di massa entrante/uscente da ogni faccia del volume computazionale è mediamente nullo. Quando la cappa è operativa, per la conservazione della massa la somma dei flussi entranti deve eguagliare la somma dei flussi uscenti: in particolare, l'aria estratta dalla cappa dalle sezioni E1 ed E2,  $\dot{m}_{hood}$ , deve essere entrata da qualcuna delle altre sezioni. La frazione di aria estratta da un sistema aspirante può essere solo una porzione del flusso d'aria che globalmente entra nel volume di controllo attraverso le superfici esterne,  $\sum_k \dot{m}_{in,k}$ . Una parte di quest'aria può infatti uscire da queste stesse superfici, senza attraversare la cappa. Possiamo definire il rapporto tra l'aria estratta dal sistema aspirante e l'aria entrante nel volume di controllo dall'ambiente esterno come frazione estratta: un valore basso della frazione estratta indica che il sistema aspirante è efficace per richiamare aria dall'ambiente esterno e selettiva nella sua estrazione.

La portata in massa *per se* non è tuttavia un buon indicatore dell'efficienza di estrazione dei fumi: il fumo è associato alla sola frazione di aria calda e il sistema di captazione lavora in modo efficiente se viene estratta aria calda.

Dalla conservazione dell'entalpia, in condizioni di stazionario la somma dei flussi entalpici entranti/uscenti dal volume di controllo e il flusso estratto dal sistema aspirante devono eguagliare il flusso termico rilasciato dal coke,  $H_{met}$ . Per valutare l'effetto della presenza della cappa, valuteremo tutti i flussi entalpici rispetto al valore della temperatura ambiente:

$$H_{in,k} = c_p \dot{m}_{in,k} (T - T_{env}) \quad (3)$$

$$H_{out,k} = c_p \dot{m}_{out,k} (T - T_{env}) \quad (4)$$

In questo modo, i flussi entalpici associati alla massa che entra nel volume di controllo da una qualsiasi superficie è nullo perchè  $T = T_{env}$ . Il flusso entalpico associato a masse di aria in uscita da sezioni

del volume di controllo diverse dalla sezione/i di estrazione del sistema aspirante sono associate ad aria che si trova a temperatura maggiore di quella ambiente, ovvero fumo che potenzialmente sfugge alla cattura del sistema di captazione.

Le prestazioni del sistema aspirante saranno espresse utilizzando:

- la frazione di aria estratta, i.e. la frazione di massa che globalmente entra attraverso le superfici del volume di controllo che viene estratta dal sistema aspirante, data da

$$\eta_{mass} = \frac{\dot{m}_{hood}}{\sum_k \dot{m}_{in,k}} \quad (5)$$

dove  $k = 1, 6$  identifica ogni superficie del dominio computazionale;

- l'efficienza entalpica di estrazione, i.e. la frazione di flusso termico generato all'interno del dominio che risulta estratto attraverso la sezione/i di aspirazione del sistema aspirante, definita come:

$$\eta_{entalpica} = \frac{H_{cappa}}{H_{coke}} \quad (6)$$

Poiché abbiamo deciso di rappresentare il fumo come la porzione del volume di aria la cui temperatura risulta essere superiore di un grado rispetto alla temperatura ambiente, l'efficienza entalpica rappresenta la frazione di fumi captata.

L'elaborazione dei dati ottenuti dalle simulazioni numeriche è riassunta nelle Tabelle 3-4.

La Tabella 3 mostra che la frazione di aria estratta è pari al 99.986% per la cappa di sfornamento. La frazione di aria maggiore è estratta dalla sezione di aspirazione centrale; tuttavia a questa massa è associato un flusso entalpico (un quantitativo di fumi) piuttosto ridotto (1.56% del totale). Ognuna delle sezioni di aspirazione laterali invece estrae nella ridotta portata d'aria (22.379% della massa globalmente aspirata) una significativa frazione di fumi (48% e 47.7%). Solo una piccola frazione di fumi non risulta captata e l'efficienza entalpica globale risulta pari al 97.36%.

	$H_{out}/H_{coke}, [\%]$	$\dot{m}_{out,k}/\dot{m}_{out,tot}, [\%]$	$\dot{m}_{in,k}/\dot{m}_{in,tot}, [\%]$
Sezione aspirante C1	48.06	22.379	0.000
Sezione aspirante D	1.56	55.226	0.000
Sezione aspirante C2	47.74	22.379	0.000
Fronte forno	0.00	0.000	63.124
Retro cappa R1	0.00	0.001	10.110
Retro cappa R2	0.00	0.000	10.624
Gap carro/cappa	0.00	0.001	16.154
Totale	<u>97.36</u>	<u>99.986</u>	100.014

Tabella 3: Ripartizione dei flussi di massa e dei flussi entalpici calcolati per la cappa di sfornamento (H1). L'efficienza entalpica e la frazione estratta sono sottolineate.

La Tabella 4 mostra che per la cappa di raffreddamento la frazione di aria estratta è pari al 98.343%. L'aria estratta dalla cappa proviene dall'unica apertura presente nel dominio, costituita dall'intercapedine tra carro e cappa. Una minima frazione d'aria (1.657% dell'aria movimentata) esce dalla fessura tra cappa e carro. L'esistenza di questo piccolo trafileamento è evidenziato dall'efficienza entalpica, che si attesta ad un valore comunque elevato, pari a 98.72%.

	$H_{out}/H_{coke}, [\%]$	$\dot{m}_{out,k}/\dot{m}_{out,tot}, [\%]$	$\dot{m}_{in,k}/\dot{m}_{in,tot}, [\%]$
Sezione aspirazione E1	49.33	49.172	0.00
Sezione aspirazione E2	49.39	49.172	0.00
Gap cappa/carro	0.13	1.657	100.00
Totale	<u>98.72</u>	<u>98.343</u>	100.00

Tabella 4: Ripartizione dei flussi di massa e dei flussi entalpici calcolati per la cappa di raffreddamento (H2). L'efficienza entalpica e la frazione estratta sono sottolineate.

## 7 Conclusioni

In questo lavoro è stato analizzato numericamente il funzionamento di due sistemi di captazione ed estrazione fumi che sono stati progettati per essere installati presso la cokeria dell'impianto Ilva di Taranto.

I due sistemi sono:

- sistema di estrazione H1, cappa di sfornamento coke;
- sistema di estrazione H2, cappa di raffreddamento,

I risultati della simulazione numerica realizzata per la cappa di sfornamento indicano che:

- il sistema è correttamente dimensionato per garantire una adeguata velocità di captazione dei fumi in corrispondenza della sezione aspirante affacciata sul carro. In Figura 24 è mostrata la distribuzione della componente verticale di velocità. Valori positivi e negativi indicano flussi ascendenti e discendenti. La velocità in corrispondenza delle fessure di aspirazione anteriore e posteriore varia da 0.5 a 2 m/s. Le zone a flusso discendente sono confinate nella porzione centrale della cappa e sotto il setto che si estende sotto la guida coke;

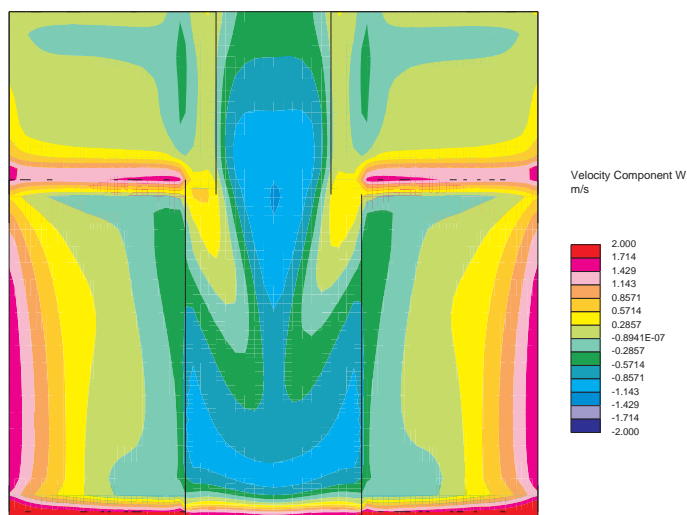


Figura 24: Cappa di raffreddamento (H1): componente verticale di velocità in corrispondenza della sezione inferiore della cappa di aspirazione.

- il sistema permette di minimizzare le fughe di aria dall'intercapedine tra carro e cappa. In Figura 25 sono rappresentate le componenti di velocità nel piano orizzontale calcolate in corrispondenza delle sezioni di comunicazione tra sistema di aspirazione e ambiente esterno. Queste sezioni comprendono la superficie che si affaccia sulla guida coke, le due superfici posteriori del volume tra guida coke e cappa di sfornamento, allineate con la sezione frontale della cappa centrale e il gap tra carro e cappa. Come si può osservare, i vettori, di lunghezza variabile a seconda della posizione lungo il perimetro del carro, sono quasi tutti orientati verso l'interno del volume. Le superfici a velocità più bassa sono quella esterna alla parete del carro e le due superfici posteriori del volume tra guida coke e cappa di sfornamento.
- il sistema è idoneo per contenere al suo interno i fumi che si sviluppano dalla superficie su cui è caricato il coke. In Figura 26 si vede che l'intero volume della cappa contiene aria a temperatura superiore almeno di un grado rispetto alla temperatura ambiente ma in corrispondenza

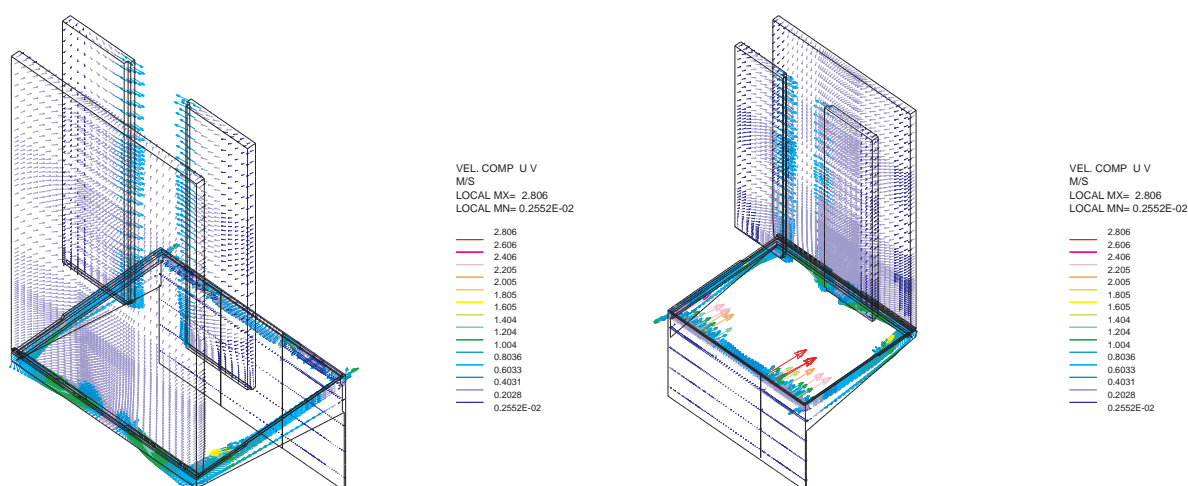


Figura 25: Cappa di sfornamento (H1): componenti di velocità nel piano orizzontale verticale in corrispondenza delle sezioni di comunicazione tra cappa di sfornamento e ambiente esterno.

delle superfici comunicanti con l'ambiente esterno non ci sono zone di temperatura superiori a quella ambiente (associabili essenzialmente a fumi uscenti dal carro); questo indica l'assenza di significativo trafilamento di fumi dalla cappa di sfornamento all'ambiente.

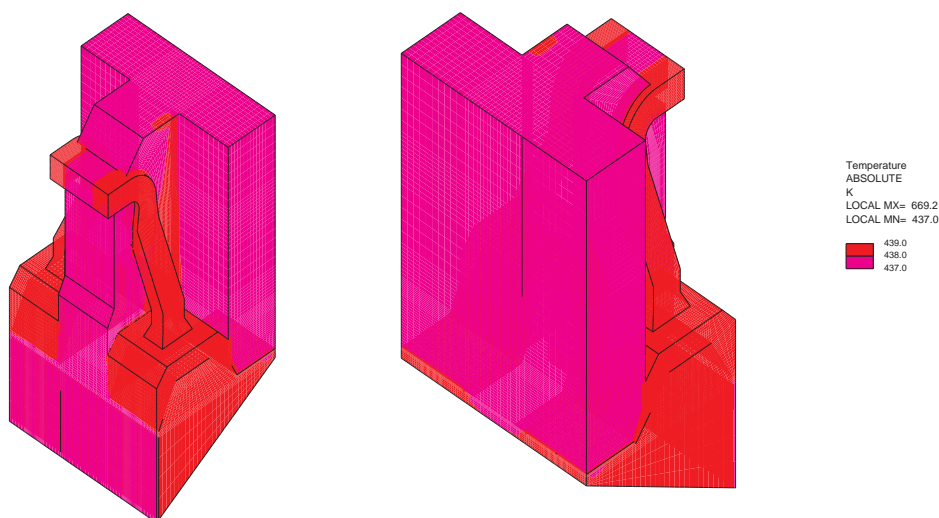


Figura 26: Cappa di sfornamento (H1): temperatura dell'aria all'interno del sistema aspirante e in corrispondenza delle sezioni di possibile trafilamento verso l'ambiente esterno.

- il sistema è caratterizzato da una efficienza entalpica di captazione decisamente elevata (97.35%), che dovrebbe garantire il contenimento delle emissioni diffuse della cokeria nella fase di scaricamento del coke dal forno al carro.

I risultati della simulazione numerica realizzata per la cappa di raffreddamento indicano che:

- il sistema è correttamente dimensionato per garantire una adeguata velocità di captazione dei fumi in corrispondenza della sezione aspirante affacciata sul carro. In Figura 27 è mostrata la distribuzione della componente verticale di velocità. Valori positivi e negativi indicano flussi



ascendenti e discendenti. La velocità in corrispondenza dell'intercapedine periferica di estrazione varia da 0.5 a 3 m/s. Le zone a flusso discendente sono confinate sotto la cupola e sotto il setto che si estende dal bordo cappa verso il bordo del carro;

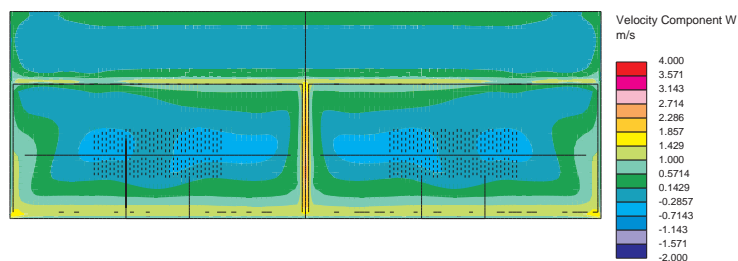


Figura 27: Cappa di raffreddamento (H2): componente verticale di velocità in corrispondenza della sezione di cappa affacciata sul carro.

- il sistema permette di minimizzare le fughe di aria dall'intercapedine tra carro e cappa. In Figura 28 sono rappresentate le componenti di velocità nel piano orizzontale calcolate in corrispondenza delle sezioni di comunicazione tra carro e ambiente esterno. Come si può osservare i vettori, di lunghezza variabile a seconda della posizione lungo il perimetro del carro, sono tutti orientati verso l'interno del volume. La superficie a velocità più bassa è quella esterna alla parete del carro.

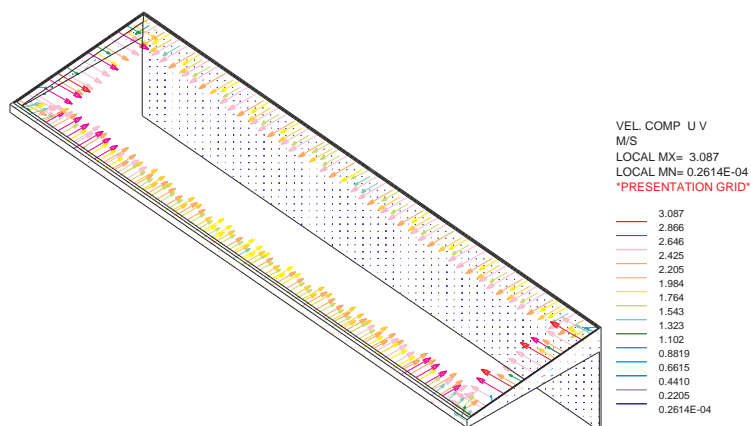


Figura 28: Cappa di raffreddamento (H2): componenti di velocità nel piano orizzontale verticale in corrispondenza delle sezioni di comunicazione tra carro e ambiente esterno.

- il sistema è idoneo per contenere al suo interno i fumi che si sviluppano dalla superficie su cui è caricato il coke. In Figura 29 si vede che, l'intero volume della cappa contiene aria a temperatura superiore almeno di un grado rispetto alla temperatura ambiente ma in corrispondenza del gap cappa/carro non ci sono zone di temperatura superiori a quella ambiente (associabili essenzialmente a fumi uscenti dal carro); questo indica l'assenza di significativo trafilamento di fumi dal carro all'ambiente.
- il sistema è caratterizzato da una efficienza entalpica di captazione decisamente elevata 98%, che dovrebbe garantire il contenimento delle emissioni diffuse della cokeria nella fase di trasporto del coke alla torre di raffreddamento.

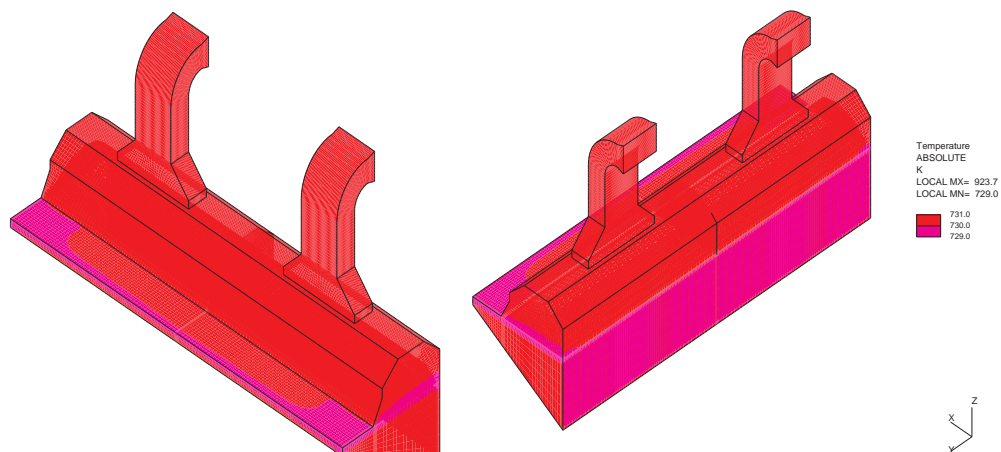


Figura 29: Cappa di raffreddamento (H2): temperatura dell'aria all'interno del sistema aspirante e in corrispondenza delle sezioni di possibile trafilamento verso l'ambiente esterno.

Anche se nelle condizioni di installazione e funzionamento reale degli impianti è lecito attendersi delle riduzioni riguardo ai valori di efficienza di captazione qui calcolati, lo studio dimostra che i sistemi di estrazione contribuiranno comunque in modo molto significativo al contenimento delle emissioni fuggitive per il controllo delle quali sono stati predisposti.

## Riferimenti bibliografici

- [1] D.L. 4 giugno 2013, n. 61 "Nuove disposizioni urgenti a tutela dell'ambiente, della salute e del lavoro nell'esercizio di imprese di interesse strategico nazionale".
- [2] Kasai, A., Muraya, T., Ono, Y., Measurement of Effective Thermal Conductivity of Coke, *ISIJ International*, **33**(6), 697–702, 1993.
- [3] OMEV, "Studio teso a valutare il convogliamento delle emissioni connesse alla fase di trasferimento del coke dal punto di sfornamento al punto di spegnimento nonché dalla torre di spegnimento al punto di scarico sul nastro", Ordine ILVA spa n.5049MP/GB del 08-03-2013, Emissione: 11 Marzo 2013, Revisione : n.007 del 26-04-2013.
- [4] Patankar S.V. and Spalding D.B., A calculation procedure for heat and mass transfer in three dimensional parabolic flows, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **15**, 1787-1806, 1972.