

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Energetica “S. Stecco”

Scuola di Dottorato in Ingegneria Industriale e dell’Affidabilità

XXIII Ciclo

TESI DI DOTTORATO

**“ SVILUPPO DI UNA GALLERIA INNOVATIVA  
PER L’ANALISI SPERIMENTALE AVANZATA DI  
COMPONENTI DI TORCE INDUSTRIALI ”**

**Relatori:**

*Prof. Ing. ENNIO A. CARNEVALE*

*Dott. Ing. ANTONIO ANDREINI*

**Responsabile della scuola di Dottorato**

*Prof. Ing. MARIO TUCCI*

**Candidato**

*Ing. FEDERICO TRIPPI*



*I miei più sentiti ringraziamenti a tutte le persone che hanno collaborato con me alla realizzazione del progetto. Un pensiero speciale per la ditta GAM Oil&Gas, al Sig. Caparra, all'Ing Gaetano Chiarelli e a Francesco Mazzeo.*

*Ringrazio coloro che mi hanno reso gradevole e appagante lo sviluppo del progetto non solo come colleghi ma anche come amici, dando maggiormente valore al lavoro sia sul piano tecnico che umano: Antonio, Lorenzo, Cosimo, Stefano e Carlo.*

*Infine desidero ringraziare in modo speciale il Prof. Ennio Carnevale che con questo progetto e soprattutto con questi tre anni e mezzo trascorsi assieme, mi ha permesso di affrontare un significativo sentiero di crescita formativa sia come ingegnere che come persona.*







# *Indice*

**Titolo:**

*Sviluppo Di Una Galleria Innovativa Per L'analisi Sperimentale Avanzata Di Componenti Di  
Torce Industriali*





---

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1: <b><i>INQUADRAMENTO DELLE PRINCIPALI PROBLEMATICHE E ANALISI CFD PER LA PROGETTAZIONE DI UN BANCO PROVA PER TORCE INDUSTRIALI</i></b>	
1.1 <i>PREMESSA</i>	11
1.2 <i>INTRODUZIONE AI CONCETTI FONDAMENTALI PER LO SVILUPPO DI TORCE INDUSTRIALI</i>	11
1.3 <i>RICERCA BIBLIOGRAFICA ED INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA</i>	13
1.4 <i>CARATTERISTICHE COSTITUTIVE DELLE TORCE INDUSTRIALI</i>	15
1.5 <i>PROBLEMATICHE TIPICHE PER SISTEMI DI TORCE INDUSTRIALI</i>	17
1.6 <i>COMPONENTI FONDAMENTALI DELLA STRUTTURA</i>	19
1.7 <i>PRINCIPALI PARAMETRI PROGETTUALI PER LA MODELLIZZAZIONE DI TORCE INDUSTRIALI</i>	21
1.8 <i>DEFINIZIONE DELLA TIPOLOGIA DI TORCE SU CUI DIMENSIONARE IL BANCO PROVA</i>	25
1.9 <i>STUDIO DELLA FIAMMA PRODotta DA TORCE INDUSTRIALI E DEFINIZIONE DEI MODELLI NUMERICI</i>	27
1.9.1 <i>SELEZIONE DI UN MODELLO PER LO STUDIO DELLE FIAMMA PILOTA</i>	28
1.9.2 <i>SELEZIONE DI UN MODELLO DI INTERAZIONE DELLA FIAMMA PILOTA CON LA FIAMMA PRINCIPALE</i>	29
1.10 <i>ELEMENTI CARATTERIZZANTI DEL MODELLO DI COMBUSTIONE</i>	30
1.10.1 <i>FIAMMA DIFFUSIVA LAMINARE</i>	30
1.10.2 <i>FIAMMA DIFFUSIVA TURBOLENTA</i>	33
1.11 <i>CRITERI DI DIMENSIONAMENTO PER BANCHI SPERIMENTALI – GALLERIA DEL VENTO CALDA</i>	35
1.12 <i>GALLERIA DEL VENTO DELL'UNIVERSITÀ DELL'ALBERTA (FLARE TEST RIG)</i>	36
1.12.1 <i>STRUMENTAZIONE PER MISURE</i>	39
1.13 <i>LINEE GUIDA PER IL DIMENSIONAMENTO DELLA CAMERA</i>	41
1.13.1 <i>DIMENSIONAMENTO DELLA CAMERA DI PROVA</i>	41

<i>1.13.2</i>	<i>NUMERO DI REYNOLDS</i>	<i>42</i>
<i>1.13.3</i>	<i>CONSIDERAZIONI DI TIPO ENERGETICO PER IL DIMENSIONAMENTO DEL BANCO</i>	<i>42</i>
<i>1.14</i>	<i>SCelta DELLA TIPOLOGIA DI BANCO PROVA PER L'ANALISI DI TORCE INDUSTRIALI.</i>	<i>51</i>
<i>1.14.1</i>	<i>GALLERIA DEL VENTO AD ESTENSIONE ORIZZONTALE PER TORCE A BASSA VELOCITÀ DI EFFLUSSO</i>	<i>52</i>
<i>1.15</i>	<i>GALLERIA DEL VENTO AD ESTENSIONE VERTICALE PER TORCE AD ALTA VELOCITÀ DI EFFLUSSO</i>	<i>57</i>
<i>1.16</i>	<i>SVILUPPO COMPUTAZIONALE DEI MODELLI DI COMBUSTIONE</i>	<i>62</i>
<i>1.16.1</i>	<i>VALIDAZIONE DEL MODELLO PER LA FIAMMA PILOTA</i>	<i>63</i>
<i>1.16.2</i>	<i>VALIDAZIONE DEL MODELLO DELL'INTERAZIONE DELLA FIAMMA PILOTA CON LA FIAMMA PRINCIPALE</i>	<i>66</i>
<i>1.17</i>	<i>SOFTWARE COMMERCIALI PER LA PROGETTAZIONE DI TORCE INDUSTRIALI</i>	<i>69</i>
<i>1.18</i>	<i>INDIVIDUAZIONE DELLE CORRELAZIONI DI PRIMO DIMENSIONAMENTO PER APPARATI SPERIMENTALI DEDICATI AL LO STUDIO DI TORCE INDUSTRIALI</i>	<i>70</i>
<i>1.18.1</i>	<i>CRITERI DI SCALATURA E VALUTAZIONE ZERO-DIMENSIONALE DEL FENOMENO</i>	<i>76</i>
<i>1.19</i>	<i>ANALISI CFD PRELIMINARE DEL BANCO PROVA</i>	<i>83</i>
<i>1.19.1</i>	<i>MODELLO DI COMBUSTIONE TURBOLENTA</i>	<i>83</i>
<i>1.19.2</i>	<i>VALUTAZIONE CFD DEL MODELLO DI FIAMMA SVILUPPATO NEL BANCO PROVA</i>	<i>85</i>
<i>1.20</i>	<i>CONCLUSIONI</i>	<i>95</i>

**CAPITOLO 2:*****PROGETTAZIONE E SVILUPPO DEL BANCO PROVA PER TORCE INDUSTRIALI***

<i>2.1</i>	<i>PREMESSA</i>	<i>99</i>
<i>2.2</i>	<i>DEFINIZIONE DEL PROGETTO</i>	<i>100</i>
<i>2.3</i>	<i>CARATTERISTICHE REALIZZATIVE DELLE TESTE DI COMBUSTIONE PER TORCE</i>	<i>100</i>
<i>2.4</i>	<i>MOTIVAZIONI CHE LA SCELTA DALLA LINEA DI PROGETTO</i>	<i>102</i>
<i>2.5</i>	<i>DEFINIZIONE DEI BANCHI PROVA</i>	<i>104</i>
<i>2.6</i>	<i>SVILUPPO DEL BANCO PROVA PER TORCE SCALATE</i>	<i>105</i>
<i>2.6.1</i>	<i>SCALATURA DEL MODELLO</i>	<i>110</i>
<i>2.6.2</i>	<i>PRIMA VALUTAZIONE SULLA STRUTTURA DEL MODELLO</i>	<i>111</i>
<i>2.6.3</i>	<i>DEFINIZIONE ESECUTIVA DELLA CAMERA E DELLE LINEE</i>	<i>114</i>
<i>2.6.4</i>	<i>DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE DELLA CAMERA E SCELTE REALIZZATIVE DEFINITIVE</i>	<i>114</i>
<i>2.6.5</i>	<i>ANALISI STRUTTURALE DELLA CAMERA</i>	<i>122</i>
<i>2.7</i>	<i>SVILUPPO DEL BANCO PROVA IN SCALA 1:1</i>	<i>123</i>
<i>2.8</i>	<i>DEFINIZIONE DEI RANGE DI FUNZIONAMENTO DEL BANCO E DIMENSIONAMENTO IMPIANTISTICO DELLE CONDOT</i>	<i>138</i>
<i>2.9</i>	<i>RIEPILOGO DELLE CARATTERISTICHE FUNZIONALI DEL AREA DI TEST</i>	<i>145</i>
<i>2.10</i>	<i>DEFINIZIONE DELLE LINEE IMPIANTISTICHE E DELLA STRUMENTAZIONE</i>	<i>148</i>
<i>2.10.1</i>	<i>INTRODUZIONE</i>	<i>148</i>
<i>2.10.2</i>	<i>LINEE PRIMARIE</i>	<i>149</i>
<i>2.10.3</i>	<i>LINEE AUSILIARI</i>	<i>150</i>
<i>2.11</i>	<i>DEFINIZIONE DEI P&amp;ID</i>	<i>153</i>
<i>2.12</i>	<i>INDIVIDUAZIONE DEI SENSORI PER IL MONITORAGGIO ED IL CONTROLLO DEL BANCO</i>	<i>160</i>
<i>2.12.1</i>	<i>VALUTAZIONE 1: SCENARIO CON CONFIGURAZIONE MINIMA</i>	<i>162</i>
<i>2.12.2</i>	<i>VALUTAZIONE 2: SCENARIO CON CONFIGURAZIONE OTTIMALE</i>	<i>163</i>

<i>2.13 SENSORI SCELTI E DEFINIZIONE COLLEGAMENTI COL SISTEMA DI ACQUISIZIONE</i>	<i>165</i>
<i>2.13.1 TERMOCOPPIE</i>	<i>165</i>
<i>2.13.2 TRASDUTTORI DI PRESSIONE</i>	<i>168</i>
<i>2.13.3 MISURATORI DI PORTATA:</i>	<i>169</i>
<i>2.13.4 VALVOLE DI REGOLAZIONE DELLA PORTATA</i>	<i>174</i>
<i>2.14 SISTEMA DI ACQUISIZIONE DEGLI INQUINANTI</i>	<i>176</i>
<i>2.15 CONDIZIONAMENTO DEI SEGNALI PER LA CATENA DI ACQUISIZIONE DATI</i>	<i>178</i>
<i>2.15.1 COEFFICIENTE TARATURA TERMOCOPPIE</i>	<i>179</i>
<i>2.15.2 COEFFICIENTE TARATURA MISURATORI DI PRESSIONE</i>	<i>180</i>
<i>2.15.3 MISURATORI DI PORTATA</i>	<i>181</i>
<i>2.16 SISTEMA DI ACQUISIZIONE DEI SEGNALI</i>	<i>183</i>
<i>2.16.1 COMPONENTI CATENA DI ACQUISIZIONE</i>	<i>183</i>
<i>2.16.2 REALIZZAZIONE CIRCUITALE DEL SISTEMA DI ACQUISIZIONE</i>	<i>186</i>
<i>2.17 SVILUPPO DEL SOFTWARE DI ACQUISIZIONE DELLA CAMERA.</i>	<i>194</i>
<i>2.18 ALLESTIMENTO DELLO SKID PER IL CONTROLLO DELLE LINEE</i>	<i>198</i>
<i>2.19 REALIZZAZIONE DEI SISTEMI DI ALLOGGIAMENTO DELLE TORCE SCALATE</i>	<i>206</i>
<i>2.20 PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI MISCELAMENTO E DEL WATERSEAL</i>	<i>212</i>
<i>2.21 LAYOUT DEFINITIVO DELLA ZONA ADIBITA ALLA REALIZZAZIONE DEI BANCHI PROVA</i>	<i>218</i>
<i>2.22 ACCORGIMENTI IMPIANTISTICI DELLO SKID E DEL BANCO PER L'ALLESTIMENTO DELLE LINEE</i>	<i>223</i>
<i>2.23 SISTEMA DI CONTROLLO PER L'ACCENSIONE E L'ADDUZIONE DEI GAS AL TEST RIG.</i>	<i>228</i>
<i>2.24 CONCLUSIONI</i>	<i>229</i>

---

**CAPITOLO 3:*****PROGETTAZIONE E SPERIMENTAZIONE DI TESTE INDUSTRIALI DI  
NUOVA CONCEZIONE***

<i>3.1</i>	<i>PREFAZIONE</i>	233
<i>3.2</i>	<i>PROGETTAZIONE AVANZATA DEL PILOTA INNOVATIVO PER TORCE INDUSTRIALI</i>	233
<i>3.2.1</i>	<i>GEOMETRIA DEL PILOTA DI NUOVA CONCEZIONE</i>	234
<i>3.2.2</i>	<i>ANALISI CFD INTERAZIONE PILOTA - TORCIA</i>	240
<i>3.3</i>	<i>PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DEI PROTOTIPI DI TORCIA</i>	249
<i>3.4</i>	<i>COLLAUDO DEI DISPOSITIVI</i>	254
<i>3.5</i>	<i>SPERIMENTAZIONE DEI SISTEMI</i>	254
<i>3.6</i>	<i>PROVE SPERIMENTALI EFFETTUATE SUI PROTOTIPI DI TESTA PER TORCE INDUSTRIALI</i>	259
<i>3.6.1</i>	<i>CONFIGURAZIONE 1</i>	260
<i>3.6.2</i>	<i>CONFIGURAZIONE 2</i>	265
<i>3.6.3</i>	<i>CONFIGURAZIONE 3</i>	268
<i>3.7</i>	<i>ANALISI DEGLI INQUINATI</i>	272
<i>3.8</i>	<i>PROVA DI ACCENSIONE DERRIK</i>	273
<i>3.9</i>	<i>ANALISI TERMOGRAFICHE</i>	275
<i>3.10</i>	<i>VALUTAZIONI SULLA RIDUZIONE DI EMISSIONI DI CO<sub>2</sub></i>	280
<i>3.11</i>	<i>VALUTAZIONI SULL'IRRAGGIAMENTO E SUL RUMORE PRODOTTO DALLE TORCE IN CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO</i>	281
<i>3.12</i>	<i>RAGGIUNGIMENTO DEGLI OBIETTIVI DEL PROGETTO</i>	283
<i>3.12.1</i>	<i>RAFFRONTO TRA OBIETTIVI RAGGIUNTI E PREVENTIVATI</i>	285
<i>3.13</i>	<i>CRITICITÀ RISCONTRATE E IMPLEMENTAZIONI FUTURE</i>	288
<i>3.14</i>	<i>CONCLUSIONI</i>	289
	<b>CONCLUSIONI</b>	291
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	300









# *Introduzione*

Titolo:

*Sviluppo Di Una Galleria Innovativa Per L'analisi Sperimentale Avanzata Di  
Componenti Di Torce Industriali*



Ad oggi i dispositivi per la combustione di gas residui (tail gases) nei diversi processi industriali del settore petrolchimico rappresenta un elemento fondamentale per i processi stessi, sebbene siano caratterizzati da un livello tecnologico per il quale le conoscenze e le tecnologie più avanzate ed efficienti sono patrimonio di poche industrie di livello internazionale. Esistono diverse tipologie di torce, vi sono infatti quelle che lavorano in condizione di regime e con continuità, provvedendo alla combustione del gas residuo (waste), e quelle invece che sono predisposte ad entrare in funzione in condizioni di emergenza, per eliminare gas che possono formarsi nell'impianto a causa di improvvisi arresti della produzione.

I sistemi di combustione del tail gas, denominati comunemente torce (flare), sono impiegati negli impianti petrolchimici per eliminare i gas residui del processo industriale; tali sistemi rappresentano un elemento critico dell'impianto sia sotto il profilo ambientale, di sicurezza ed energetico.

Lo stato dell'arte dei sistemi di combustione dei gas residui è caratterizzato ad oggi da soluzioni basate su camere di post combustione singole o doppie a fiamma libera non controllata. Questo tipo di approccio, che da sempre ha segnato gli sviluppi dei sistemi di trattamento finale dei tail gases, ha storicamente manifestato dei limiti in termini di efficienza energetica, dovuti all'impiego di combustibile aggiuntivo mirato a stabilizzare le reazioni di combustione ed a garantire il completo processo di tutto il volume di gas smaltito. Alla base delle tecnologie attualmente disponibili, a livello di camini, camere di combustione e torce, sono pertanto rimasti gli approcci classici di progettazione mirati a garantire una combustione completa dei gas tramite sovralimentazione di combustibile e comburente, con regolazioni semplificate e riferite, al più, alle portate e temperature dei gas da trattare, nonché eventualmente alle prove a campione sulle emissioni residue. Con l'evoluzione del livello tecnologico degli impianti petrolchimici e la sempre maggior sensibilizzazione, sia relativamente alle problematiche di carattere ambientale, sia e soprattutto alle problematiche di risparmio energetico, si sono andati sempre più evidenziando i limiti dell'approccio classico alla progettazione e realizzazione dei sistemi di combustione dei tail gas, che sono diventati oggi uno

dei principali elementi per i quali è ormai indispensabile uno sviluppo significativo in grado di far fronte alle nuove esigenze di mercato.

Proprio per rispondere alle esigenze sopra descritte, la presente tesi di ricerca si pone come obiettivo quello di generare e di validare una metodologia di analisi, studio, progettazione e realizzazione dei sistemi di combustione dei tail gases, tramite la realizzazione e la successiva sperimentazione di sistemi di fiamma di nuova concezione. Il lavoro, durato tre anni, è stato realizzato all'interno di un bando ministeriale di ricerca e sviluppo al interno del quale il Dipartimento di Energetica dell'Università di Firenze ha affiancato la ditta calabra (V.V.) G.A.M Oil&Gas, unendo la lunga esperienza acquisita storicamente nello sviluppo dei sistemi di fiamma tradizionali, all'esperienza impiantistica e di carpenteria meccanica della ditta.

La G.A.M. Srl è oggi una realtà affermata nel panorama industriale Italiano, ben inserita nel settore della produzione di componenti per caldareria ed industria petrolchimica e svolge la sua attività come partner di società industriali leader a livello internazionale nei relativi settori. Il progetto realizzato e portato a termine con successo, è stato concepito nell'ottica di fornire alla ditta le competenze metodologiche e le infrastrutture necessarie al fine di mantenere il proprio mercato e di continuare a soddisfare le esigenze sempre più pressanti dei propri clienti, sviluppando ricerche adeguate nel settore dei sistemi di combustione dei tail gases, migliorandone il know-how e favorendo così lo sviluppo, sia delle capacità produttive interne, sia del livello tecnologico dei prodotti immessi sul mercato.

L'obiettivo finale del presente progetto è stato pertanto quello di realizzare un'innovativa procedura di analisi dei sistemi di combustione dei tail gases così da raggiungere la definizione di una metodologia innovativa di progettazione e controllo degli stessi sistemi e quindi realizzare una serie di prototipi in grado di verificare sul campo la bontà delle soluzioni innovative studiate. L'innovatività del presente lavoro di ricerca risiede infatti proprio nel superare l'attuale livello di analisi e progettazione delle torce, basato su di un approccio principalmente empirico, per passare ad un sistema innovativo di simulazione fluidodinamica e di sperimentazione in ambiente controllato, in grado di pilotare la progettazione

stessa verso obiettivi di riduzione di combustibile addizionale e di ottimizzazione ambientale di processo.

Le problematiche principali affrontate durante lo sviluppo del lavoro sono state molteplici ma il controllo delle condizioni termofisiche della combustione e la riduzione degli inquinanti prodotti sintetizzano complessivamente le fondamentali richieste industriali dettate dall'eliminazione del gas residuo, minimizzandone l'impatto ambientale al fine di non rilasciare in atmosfera pericolosi idrocarburi non completamente combusti o quantità significative di particolato solido (smoke).

Le emissioni di particolato sono molto pericolose per l'uomo (causano ostruzione delle vie respiratorie ecc.) e la presenza di particelle solide nella corrente gassosa favorisce la condensazione d'idrocarburi pesanti, con conseguente deposizione nel terreno circostante l'impianto: le emissioni di particolato solido costituiscono infatti, da sempre, il principale fattore di rischio che ne vincola la possibilità di installazione in prossimità di zone residenziali, anche se attualmente le torce vengono progettate per operare in modalità smokeless nel più ampio range di condizioni operative.

Le caratteristiche del tail gas sono però molto variabili in quanto generalmente si tratta di gas a potere calorifico medio-basso e di solito non risultano costanti nel tempo anche all'interno del medesimo impianto. Questa variabilità comporta inevitabili problemi di stabilità di combustione, ai quali attualmente si ovvia introducendo un considerevole numero di fiamme pilota alimentate con combustibile ad alto potere calorifico. Queste fiamme pilota hanno la duplice funzione di incrementare la stabilità di combustione e garantire la completa combustione del tail gas; talvolta, in alcuni casi, può essere anche necessario miscelare al tail gas del combustibile ad alto potere calorifico al fine di favorirne la combustione stabilizzando le reazioni.

Le suddette soluzioni oggi impiegate, possono comunque rivelarsi insufficienti per evitare l'insorgenza di fenomeni di spegnimento della fiamma o addirittura di ritorno di fiamma, conseguentemente spesso si introducono anche sistemi di stabilizzazione, basati sul mantenimento di elevate velocità del flusso dei fumi. Tali soluzioni, quando il gas è disponibile a pressioni basse (torri molto alte e/o

elevate perdite di carico nel circuito di alimentazione) rendono spesso necessario, per accelerare il gas, l'inserimento di opportune quantità di gas inerte (vapore o aria) in pressione. D'altra parte, l'incremento della velocità dei flussi, è a sua volta causa di un significativo impatto ambientale in termini di rumorosità ed emissioni vibroacustiche generate dalla combustione turbolenta.

Un altro limite delle torce industriali è dovuto all'irraggiamento prodotto dalle stesse sull'ambiente circostante, si devono infatti rispettare dei vincoli di sicurezza a causa dei quali spesso è necessaria la realizzazione di torce ad altezza considerevole, con conseguente aggravio dei costi di impianto, della complessità realizzativa a livello di componentistica e delle perdite di carico nei camini ( $\Delta p$  allo stack).

Le problematiche presentate, relativamente allo stato dell'arte nel settore delle torce, giustificano ampiamente l'interesse a sviluppare nuove tecnologie e, partendo da un livello tecnologico che presenta notevoli margini di miglioramento, è pertanto significativo effettuare ricerca scientifica in questo campo di attività. Il presente lavoro mostra quindi come tutte le criticità sopra esposte siano state affrontate e superate, dando vita a sistemi innovativi di modellazione, progettazione e realizzazione di un banco prova di grandi dimensioni per lo studio dei sistemi di fiamma, nonché dei prototipi preindustriali di torce avanzate per l'abbattimento dei tail gases. Tali dispositivi sono stati concepiti puntando ad un miglioramento dell'efficienza di abbattimento e della stabilità di combustione, minimizzando eventuali altre sorgenti di inquinamento (acustico, atmosferico, da irraggiamento etc.) e riducendo l'impiego di combustibile aggiuntivo ad alto potere calorifico. Lavorando in un settore industriale, non potendosi così esimere dall'aspetto economico del problema, il raggiungimento di tali risultati è stato pensato senza generare un aggravio dei costi, così da rendere appetibile la futura industrializzazione del sistema.

Le competenze sviluppate durante il presente lavoro di tesi hanno quindi richiesto numerosi sforzi interdisciplinari indispensabili per un corretto management del progetto: è stato infatti necessario attingere alle conoscenze legate alla fluidodinamica computazionale, così come a quelle elettroniche per

la realizzazione della catena di acquisizione, a quelle informatiche per lo sviluppo del software, o a quelle prettamente industriali necessarie per il dimensionamento impiantistico del sistema. La complessità e gli obiettivi fissati per il pieno raggiungimento del progetto sono stati dettati quindi non solo dalle difficoltà tecniche da superare in fase di progettazione e di realizzazione, ma anche dal necessario coordinamento e dall'organizzazione pianificata di tutti quegli aspetti collaterali come l'interfacciamento con i vari fornitori, la sicurezza dell'impianto, e le tempistiche imposte per la chiusura del progetto secondo gli schemi prefissati. Il completo sviluppo del progetto ha richiesto pertanto il necessario interfacciamento con altre figure tecniche coinvolte per il suo pieno raggiungimento, portando spontaneamente ad un percorso altamente formativo di project management.

Di fatto per raggiungere l'obiettivo generale di progetto è stato indispensabile procedere per attività successive, partendo dall'analisi dei sistemi attualmente in uso, fino alla realizzazione di una serie di modelli numerici in grado di simulare, con buona affidabilità, il comportamento dei flussi e delle reazioni di combustione dei processi di abbattimento. Questa prima definizione del sistema e l'acquisizione dei primi modelli previsionali di comportamento è stata indispensabile alla successiva realizzazione, sviluppo e messa in opera sia della camera di prova che dei prototipi di torcia in essa testati; in questo modo è stato possibile, sfruttando dei risultati di partenza sufficientemente affidabili, ottenere un supporto concreto allo sviluppo di una metodologia innovativa di progettazione ottimizzata per i sistemi in studio.

In coda all'analisi ricavate tramite le simulazioni numeriche e il dimensionamento zero dimensionale dei sistemi, il lavoro svolto è stato a tutti gli effetti un'attività di ricerca sperimentale mirata a alla realizzazione completa, in tutti i suoi aspetti impiantistici e sensoristici (compreso lo sviluppo del software di acquisizione e gestione dei dati) di un banco prova innovativo in grado di permettere misure dirette sui dispositivi di combustione e al contempo valutarne la resistenza agli agenti atmosferici valutando la stabilità della fiamma e la capacità di pieno funzionamento nelle fasi transitorie. Tale attività di ricerca applicata al mondo industriale, ha permesso di ottenere dei riscontri scientifici diretti su alcuni singoli aspetti dei fenomeni in studio e perlopiù di progettare,

realizzare e testare sperimentalmente, sulla base dei modelli numerici elaborati, una serie di prototipi di torce e sistemi completi di smaltimento fumi. La camera di test sviluppata ha permesso una verifica della bontà delle soluzioni tecniche realizzate tramite una campagna di prove sperimentali.

Durante tale fase di sperimentazione, come deciso nel piano di avanzamento del progetto, è stato necessario re implementare i modelli numerici e le metodologie di progettazione integrata alla luce dei dati ricavati sperimentalmente; tale iter processuale ha permesso di verificare, validare ed allineare ai dati di reale funzionamento con i modelli numerici, permettendone così un successivo utilizzo dell'azienda con un margine di affidabilità sufficiente un buon livello di affidabilità. Nella fase di sperimentazione sono stati testati tutti i sistemi di controllo e gestione dei nuovi prototipi in maniera da verificarne la risposta nelle diverse condizioni di funzionamento: ad esempio è stato possibile studiarne l'effettiva capacità di ottenere risposte conformi alle caratteristiche desiderate dei fumi prodotti, in funzione delle geometrie e dei sistemi di premiscelamento e promozione di turbolenza o, più in generale, in funzione di esigenze specifiche dettate dal funzionamento degli impianti di utilizzo.

Riassumendo il presente lavoro ha permesso di progettare e realizzare ex-novo sia una metodologia di sviluppo e test per sistemi di combustione ad uso torce industriali, partendo dai modelli numerici e impiantistici che hanno portato prima alla realizzazione del banco prova nonché della rete di sensori per l'acquisizione e la gestione dei dati, e poi successivamente alla realizzazione e alla sperimentazione di teste di combustione di nuova concezione, portando così un significativo apporto scientifico ai sistemi di test per fiamme libere di grossa dimensione in aria.







# CAPITOLO 1:

*INQUADRAMENTO DELLE PRINCIPALI  
PROBLEMATICHE E ANALISI CFD PER LA  
PROGETTAZIONE DI UN BANCO PROVA PER TORCE  
INDUSTRIALI*



Titolo:

“Sviluppo di una galleria innovativa per l’analisi sperimentale  
avanzata di componenti di torce industriali ”



### *1.1 PREMESSA*

La realizzazione del sistema di test per lo studio di torce industriali ha richiesto numerosi sforzi progettuali. La ricerca in letteratura scientifica ha permesso di individuare le caratteristiche di funzionamento e le specificità di questi sistemi ad uso strettamente industriale. Tuttavia a causa della natura stessa delle strutture in analisi, reperire materiale bibliografico disponibile non è stato banale: al mondo infatti esistono pochissimi produttori di impianti di combustione libera in aria. Essendo leader di un mercato di nicchia ma con ampia diffusione e basando la loro forza proprio sulla progettazione e l'ottimizzazione di tali impianti, delegando peraltro i lavori di carpenteria a ditte altamente specializzate, come G.A.M. Oil&Gas ad esempio, gli studi, le pubblicazioni scientifiche e la documentazione tecnica a tal proposito risulta scarsa e perlopiù difficilmente ottenibile. Per sviluppare il banco prova presentato in questo lavoro di tesi, è stato così necessario, dopo aver definito la tipologia di sistema da realizzare, studiarne separatamente i vari aspetti e le molteplici criticità progettuali. Il presente capitolo illustra le caratteristiche che contraddistinguono le tipologie di torce industriali, descrivendo poi il criterio con il quale si è scelta la tipologia di banco sperimentale. Preliminarmente alla progettazione strutturale e impiantistica, sia tramite tecniche numeriche zero dimensionali che CFD, è stato possibile fare una valutazione del fenomeno di combustione da osservare e gestire internamente alla camera, così da definire la geometria e gli ingombri delle strutture di test.

### *1.2 INTRODUZIONE AI CONCETTI FONDAMENTALI PER LO SVILUPPO DI TORCE INDUSTRIALI*

La combustione libera in aria viene utilizzata comunemente nei grandi complessi industriali di processo per eliminare i contaminanti presenti nelle emissioni gassose. Questo avviene tipicamente quando non è possibile recuperare tali composti per reintrodurli nel ciclo produttivo sia per difficoltà di natura tecnica che per motivazioni esclusivamente economiche. Per fare alcuni esempi concreti, il processo di combustione è utilizzato diffusamente per rimuovere aerosol, vapori e gas provenienti da sorgenti come gli sfiati degli

impianti chimici o i forni di verniciatura; tale tecnica consiste di fatto nell'ossidazione, sostenuta da fiamma, delle sostanze aerodisperse.

Tipicamente i principali composti inquinanti sono molecole costituite da carbonio, idrogeno e ossigeno, mentre i classici prodotti dell'ossidazione sono il biossido di carbonio ed il vapor d'acqua. Tuttavia l'utilizzo dei sistemi di combustione in aria può portare alla formazione di ossidi di azoto, nonché di particolato inorganico rappresentato per lo più dalle particelle di dimensione maggiore eventualmente coinvolte nel processo di generazione della fiamma. Nel caso che poi gli inquinanti contengano anche cloro, fluoro o zolfo, possono venire a formarsi vapori di acido cloridrico, di acido fluoridrico, biossido di zolfo che tipicamente, oltre ad essere dannose per la salute, tendono a danneggiare gli impianti stessi. Nel caso in cui la combustione non sia completa, viene anche prodotta un'enorme varietà di sostanze chimiche che, oltre ad aumentare la precipitazione di particolato, risultano spesso tossiche per l'uomo e nocive per l'ambiente (idrocarburi semplici e complessi, alcoli, esteri, chetoni, aldeidi, ecc.).

Per tali motivi, così da ridurre la presenza di tutti i suddetti inquinanti derivati, vi è spesso la necessità di associare alla camera di processo degli impianti di produzione una seconda zona di combustione in grado di ossidare i composti idrocarburi residui. Le torce industriali di processo servono proprio a fare quanto sopra descritto.

L'attività di ricerca svolta nell'ambito del progetto in questione, ha avuto come oggetto lo studio teorico preliminare dei fenomeni fisici che avvengono all'interno di una torcia per tail gases al fine di valutare quali tipologie di sistemi di analisi numerica risultassero più adeguati per l'applicazione in oggetto. Tale studio è stato svolto in collaborazione con altri ricercatori del Dipartimento di Energetica dell'Università degli Studi di Firenze che vantano competenze specifiche nel campo della simulazione CFD di flussi tridimensionali non stazionari di tipo reattivo.

### *1.3 RICERCA BIBLIOGRAFICA ED INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA*

Nonostante le difficoltà legate alla poca disponibilità di materiale tecnico in tal proposito, per inquadrare al meglio il problema in oggetto, è stata svolta una solida ricerca preliminare a carattere bibliografico sulle pubblicazioni scientifiche presenti a livello mondiale. Tale ricerca ha permesso di individuare alcuni lavori, la cui analisi critica ha consentito principalmente di definire:

- la classificazione delle principali tipologie di torce disponibili;
- i principali criteri di dimensionamento di base (avanprogetto), di contenimento delle emissioni inquinanti e di scalatura dei dispositivi per la realizzazione di banchi prova;
- le principali tecniche di misura utilizzate nella caratterizzazione sperimentale delle torce;
- le principali problematiche legate alla modellizzazione tramite approcci numerici.

Tuttavia, buona parte dei lavori reperiti fanno fondamentalmente riferimento a fenomeni di combustione di fiamme libere in aria, sottolineando gli effetti prodotti da agenti atmosferici, problematiche di miscelamento dei flussi e metodi numerici di modellizzazione numerica di modellazione CFD. La parte prettamente impiantistica è stata ricavata invece analizzando quanto estrapolabile da esperienze ottenute da altri banchi prova destinati a misure differenti da quelle effettuate nel presente progetto ma con problematiche analoghe, o da documentazione tecnica fornita da G.A.M. Oil&Gas ottenuta da commesse inerenti la realizzazione di torce industriali sulle quali la ditta ha avuto modo di lavorare in passato.

Sulla base degli elementi acquisiti nella ricerca bibliografica, sono state definite le principali caratteristiche tecniche della tipologia di torce per tail gases, definendo così la tipologia che vi si è inteso studiare; questa prima decisione ha permesso di realizzare sistemi di analisi numerica coerenti con le problematiche tecniche da analizzare con questi strumenti.

Tali caratteristiche di primo dimensionamento sono riassunte nella seguente tabella (Tabella 1):

<b>Caratteristica tecnica:</b>	<b>Valore:</b>
Tipologia di esercizio	<i>Processing elevated flare</i>
Altezza minima della torcia	20-40 m
Potere calorifico del combustibile di alimentazione	40.000 – 42.000 kJ/kg
Velocità del gas di scarico allo stack	0,15 – 0,25 Mach

**Tabella 1: Caratteristiche tecniche delle torcia tipo**

Come si evince dalla Tabella 1, nello studio in questione si andranno quindi a studiare torce atte al funzionamento cosiddetto di processo, ovvero destinate a restare accese in maniera continuativa per lunghi periodi di tempo, indipendentemente dalle condizioni atmosferiche, al fine di smaltire quantità significative di gas residuo del ciclo produttivo (il cosiddetto “*tail gas*”).

Il valore dell'altezza minima della torcia si riferisce all'alzata a cui tale dispositivo può essere posto per rispettare i valori limite di emissione di energia radiante e rumore misurati al suolo richiesti dalle normative internazionali vigenti. Uno degli aspetti che industrialmente viene infatti tipicamente sottolineato riguarda il fatto che il contenimento dell'altezza dal suolo permette di limitare il costo della torcia poiché sia la quantità di materiale metallico per la struttura di supporto risulta minore che il  $\Delta p$  necessario per l'efflusso del gas. Per raggiungere un buon compromesso tra la minimizzazione dei costi di realizzazione e l'indispensabile sicurezza necessaria per il funzionamento di tali dispositivi, operativamente il range di altezza minima viene determinato sulla base dell'intensità massima di radiazione al suolo stimabile dalle portate e dal potere calorifico della tipologia di tail gas che verrà bruciato dall'impianto.

Assieme ai parametri sopra riportati, al fine di ottenere un primo dimensionamento e un'idea delle dimensioni necessarie ad allestire una camera di prova per teste di torce industriali, è stato fondamentale valutare la lunghezza della fiamma prodotta; tale parametro, come si vedrà in seguito, è strettamente correlato alla velocità di efflusso del tail gas e alle condizioni termodinamiche di miscelamento del combustibile con il comburente (aria atmosferica).



E' stato quindi necessario svolgere un approfondito lavoro di analisi delle varie tipologie di gas residuo prodotto normalmente dagli impianti petrolchimici al fine di determinarne le composizioni chimiche e quindi le possibili reazioni chimico-cinetiche ossidative che avvengono nelle torce. Al termine di tale analisi è stata così caratterizzata, in linea di massima e in forma semplificata, in modo da poter riprodurre le caratteristiche direttamente sul banco di test, le composizioni dei tail gases che alimenteranno i prototipi di torce in studio. La Tabella 2 riassume la delle composizioni tipo del gas adoperato durante la sperimentazione dei sistemi:

<b>Componente:</b>	<b>Percentuale di massa:</b>
H <sub>2</sub> S	1.0
CO <sub>2</sub>	4.9
C-1 (idrocarburi con 1 atomo di C)	50
C-2 (idrocarburi con 2 atomi di C)	24.5
C-3 (idrocarburi con 3 atomi di C)	11.9
C-4 (idrocarburi con 5 atomi di C)	4.5
C-5 (idrocarburi con 5 atomi di C)	1.4
C-5 (idrocarburi con più di 5 atomi di C)	0.1

**Tabella 2: composizione del tail gas**

In questa prima fase di attività, sono state quindi valutate varie configurazioni di torce per tail gases quali torce a campo aperto, torce confinate in corpi cilindrici, etc. Questa analisi ha permesso di individuare quali sono le specificità che contraddistinguono tali sistemi di combustione e ha pertanto consentito di definire le peculiarità che sarebbero state poi implementate sul banco prova per studiare il funzionamento del sistema in molteplici condizioni.

#### *1.4 CARATTERISTICHE COSTITUTIVE DELLE TORCE INDUSTRIALI*

Le torce industriali vengono installate nei grossi impianti petrolchimici o di processo per abbattere eventuali rimanenze di sostanze inquinanti presenti nelle vene di gas residuo. Per buona parte, l'elemento maggiormente coinvolto in questo processo è il CO residuo che si ottiene contemporaneamente alla formazione di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O dal processo di combustione. In questo senso è

importante sottolineare che tipicamente per questa tipologia di impianti, il rendimento di combustione viene definito come la portata in massa di CO<sub>2</sub> allo scarico, rispetto alla portata di CO nei waste gas.

I gas che vengono perlopiù processati dai sistemi di torcia sono gas di scarico proveniente da processi industriali come il gas naturale e altri idrocarburi come l'etilene, il propano o il butano.

Questo tipo di emissioni gassose sono generalmente localizzate in specifici contesti produttivi individuabili tipicamente in:

- prodotti di raffinerie
- prodotti della combustione industriale da fornaci
- prodotti per impianti di trattamento del carbon coke
- scarti di industrie chimiche

Secondo le molteplici esigenze d'impianto, esistono diverse tipologie flare gas; la prima grande suddivisione è tra sistemi di torcia per processo e torce d'emergenza. La prima famiglia riguarda tutti quei sistemi di fiamma che sono tenute a lavorare in maniera continua con portate di gas da smaltire ridotte ma costanti nel tempo. Le torce di emergenza invece nascono allo scopo di smaltire grandi portate di gas in tempi molto stretti; sono montate tipicamente su piattaforme di estrazione off-shore o su impianti di raffinamento petrolchimico e servono a prevenire accumuli o sacche di combustibile aeriforme potenzialmente pericolose per problemi di detonazione inattesa.

A seconda invece delle geometrie strutturali, le torce si suddividono in torce elevate (elevated flare) e torce a terra (ground flare).

Nei paragrafi seguenti seguiti sono riportate le principali peculiarità di ciascuna tipologia.

*Torçe Elevate (Elevated Flares)*

- Presentano altezze variabili dai 10 ai 100 m e la fiamma è esposta agli agenti atmosferici. Queste sono tipicamente utilizzate in zone non residenziali onde evitare problemi di irraggiamento al suolo e caduta di tizzoni incendiari generati dalle condense che si possono formare e continuare a bruciare. Risentono di rumorosità e sono universalmente riconosciute come strutture ad alto impianto ambientale (termo - acustico).
- Solitamente ci sono due linee in parallelo in maniera da tenerne una in funzione mentre la seconda è in manutenzione permettendo il funzionamento complessivo del sistema in ciclo continuo

*Torçe A Terra (Ground Flares)*

- In questo caso le bocche di fuoco sono a terra e la fiamma si sviluppa all'interno di una camera di combustione con forma cilindrica. Non ci sono problemi causati dalla presenza di venti e altri agenti atmosferici. Sono utilizzabili in zone popolate in quanto la fiamma è confinata e occultata non dando problemi di irraggiamento. Presentano una rumorosità molto ridotta ma tuttavia sono sistemi prettamente più costosi e complessi rispetto a quelli necessari per la realizzazione di torçe elevate.

*1.5 PROBLEMATICHE TIPICHE PER SISTEMI DI TORÇE INDUSTRIALI*

Intrinsecamente al loro utilizzo e indipendentemente dalla tipologia (Figura 1), le torçe industriali presentano alcune problematiche comuni che ne caratterizzano il funzionamento. Primo tra tutti è l'irraggiamento prodotto sulle zone circostanti dalla fiamma. Questo dovrà essere opportunamente contenuto in maniera da evitare danni sulle strutture circostanti. Per fare ciò, è prassi progettuale individuare delle correlazioni per il calcolo dei fattori di vista e stimare la potenza irraggiata a terra (Radiant Intensity) [1]. Altrettanto fondamentale è evitare la formazione di combustione sporca, ovvero con presenza di smoke. Per ridurre tale effetto vengono installati degli appositi promotori di turbolenza –

meglio discussi in seguito – che hanno come effetto quello di migliorare le condizioni stechiometriche locali del flusso di gas da bruciare in torcia. Altre problematiche non trascurabili risultano:

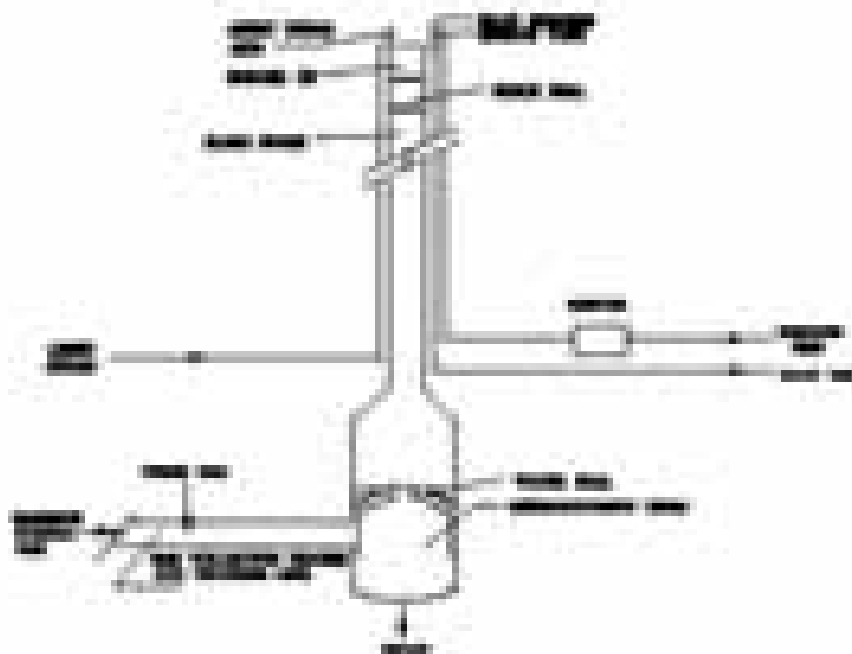
- La formazione di condense che partecipano alla combustione formando dei gocce incendiate (Burning droplets) che possono ricadere sulle zone circostanti alla torcia.
- La formazione di rumore causato dalla combustione; anche l'immissione del getto del gas in aria e l'ugello del vapore per aumentare la miscelazione sono sorgenti che aggravano tale problematica.
- La necessità di un alto rendimento di combustione per ridurre al minimo le emissioni immesse in atmosfera.
- La necessità di separare le condense con sistemi ausiliari.
- I problemi legati alla manutenzione dell'impianto.
- La messa in sicurezza dell'impianto per il personale che deve lavorare in prossimità della zona di combustione. L'accessibilità alle varie zone di attività durante il funzionamento del sistema, è stimata tramite linee guida che definiscono il valore massimo di irraggiamento e la durata ammissibile all'esposizione.



**Figura 1: Esempio di torcia elevata (destra), e di torcia a terra (sinistra)**

### 1.6 COMPONENTI FONDAMENTALI DELLA STRUTTURA

Le torce industriali presentano una geometria di base comune a tutte le tipologie sopra descritte. Come schematizzato nella Figura 2, buona parte della struttura è costituita dal corpo centrale, composto fundamentalmente da un supporto elevato dal suolo che sposta la zona di fiamma in quota.



**Figura 2: Schema elementare di una torcia industriale elevata**

Gli altri componenti, meglio descritti nei capitoli successivi, si possono individuare nelle:

- Linee di adduzione del gas di processo
- Tamburo per la raccolta delle condense
- Sistema di prevenzione tramite gas per evitare effetti di ritorno di fiamma
- Sistema di adduzione del gas per la fiamma pilota (singolo o multiplo)
- Sistema di promozione turbolenza (aria o vapore) per incrementare il momento cinetico del gas, migliorandone le condizioni di stechiometria con l'aria comburente.

I dati numerici ricavati dalle schede di manutenzione e dagli schemi progettuali di sistemi attualmente funzionanti, provenienti da commesse private gentilmente concesse in visione da GAM Oil&Gas, hanno permesso di stimare alcune condizioni di funzionamento – tipicamente riferite e strettamente connesse al tail

gas da bruciare – così da avere dei valori di riferimento che permettessero un primo dimensionamento teorico del modello di sistema da implementare impiantisticamente. Per torce di processo, il valore minimo del potere calorifico che il tail gas deve offrire al fine di garantire un processo continuo e stabile, va dai 7500 e i 9300 kJ/Nm<sup>3</sup>; per valori inferiori è necessario immettere combustibile nelle linee per garantire il corretto funzionamento del processo.

Le portate operative invece si possono suddividere in tre differenti fasce a scendo delle condizioni operative:

- (condizioni minimo funzionamento) - 45 -90 kg/hr
- (condizioni standard) - 450 -900 kg/hr
- (condizioni di emergenza) - 700 tons/h

I dati in nostro possesso, inerenti perlopiù a impianti operanti in Medio Oriente con un tail gas proveniente da lavorazioni petrolchimiche (LHV : 11200 kJ/m<sup>3</sup>), presentando un valore medio di rendimento prossimo al 98%. Tale parametro, come precedentemente illustrato, dipende dalle condizioni di combustione che si riescono ad imporre al flusso di combustibile. La tendenza alla formazione di smoke inficia pesantemente il rendimento e pertanto va controllata opportunamente; questa dipende fondamentalmente dalla concentrazione di ossigeno nella zona di combustione. Per il raggiungimento della succitate condizioni stechiometriche, così da evitare la formazione di creste nere (smoke). Per ottenere un corretto completamento delle reazioni, l'ossigeno necessario a tale fine aumenta con l'aumentare del peso molecolare del gas da bruciare. Per quantificare il fenomeno, è possibile fare riferimento al metano e al pentano; nello specifico occorrono:

- 9.6 unità di volume di aria per unità di metano
- 38.3 unità di volume aria per unità di pentano

Come facilmente deducibile da quanto sopra, così da ridurre gli effetti di smoke, tipicamente gli artifici impiantistici per ottenere la massima efficienza di combustione si ottengono regolando i quantitativi di aria primaria immessa prima della zona di combustione e quindi con un opportuno dosaggio dell'aria secondaria immessa direttamente sulla zona di fiamma. Molti impianti

manifestano la necessità di immettere aria primaria aggiuntiva per raggiungere le condizioni stechiometriche desiderate. In alternativa all'immissione forzata di flussi di comburente, come già specificato, si introducono sulle sommità delle teste dei sistemi di immissione di vapore o di aria in pressione per aumentare il rimescolamento locale dei gas, permettendo così, se opportunamente dimensionati, una combustione pulita senza produzione di fumo (smoke). Industrialmente sono disponibili due tipi di ugelli che vengono montati sulle teste di combustione a secondo della loro condizione di funzionamento: promotori interni per le basse portate di gas e promotori esterni per le alte.

### *1.7 PRINCIPALI PARAMETRI PROGETTUALI PER LA MODELLIZZAZIONE DI TORCE INDUSTRIALI*

L'analisi complessiva delle strutture di combustione ad uso industriale per l'abbattimento dei gas di processo ha messo in luce i diversi aspetti che le caratterizzano; dovendo progettare un banco prova per effettuare test su modelli scalati delle stesse, è stato opportuno quindi individuare i parametri progettuali più significativi in modo da poter definire, a partire da questi, le peculiarità del sistema. Trattando si di un sistema per il trattamento di gas, l'analisi iniziale si è concentrata sulle caratteristiche e sulle problematiche strettamente correlate al fluido elaborato. Nello specifico sono state fatte le seguenti considerazioni sulle grandezze caratteristiche che determinano il processo:

- *Composizione*

E' indispensabile stimare il contenuto e le proprietà del gas di alimento per una buona determinazione del design ottimale della torcia.

- *Portata*

Portate troppo grandi aumentano i costi d'impianto e la richiesta di manutenzione, riducendone perlopiù il tempo vita utile. La portata massima di efflusso viene usata tipicamente in condizioni di emergenza, anche se in fase progettuale l'impianto viene dimensionato su di essa. Va definita inoltre la portata limite per la quale si attiva un

processo di combustione con formazione di fumo (considerando anche le possibili condizioni di guasto o gli imprevisti che possono portare a questo)

- *Temperatura*

Se la temperatura si abbassa eccessivamente può avvenire formazione di condensa. Questo comporta la necessità di introdurre sistemi di rimozione della condensa come tamburi ad asse verticale/orizzontale (che rallentano il flusso e operano a caduta per gravità del condensato), o a ciclone (separazione per forza centrifuga). Per una corretta stima di tali effetti è necessaria un'analisi delle temperature sulla bocca di fuoco; tale valutazione è importante per ottimizzare il costo di funzionamento dell'impianto.

- *Pressione disponibile*

Il funzionamento ottimale del sistema di torcia avviene con gas ad alta pressione. La bontà, nonché l'efficienza delle teste di combustione la si ha cercando di convertire la pressione del gas in momento cinetico, così da favorire il massimo miscelamento ed evitare la formazione di combustione sporca. Ad alta pressione perlopiù, il volume del gas si riduce permettendo di diminuire le dimensioni della bocca della torcia, producendo una corrispettiva riduzione dei costi.

Per quanto riguarda invece la definizione dell'impianto, le problematiche che devono essere considerate sono quelle tipiche di natura industriale, generalmente riconducibili alla disponibilità, ai costi di realizzazione, ai requisiti di sicurezza, e ovviamente ad un limitato impatto ambientale. Trattandosi di sistemi di fiamma, e quindi per loro natura potenzialmente pericolosi e ad alto impatti ambientale, i requisiti di sicurezza sono esplicitati nella norma API(RP)521 [2].

Trattandosi perlopiù di sistemi di fiamma libera in aria, la determinazione dell'irraggiamento a terra secondo i limiti di sicurezza è uno dei requisiti indispensabili per il funzionamento in sicurezza del sistema. Le valutazioni in tal proposito sono effettuate valutando sia il caso limite (massima portata) sia il caso di normale funzionamento (attività di processo). La valutazione della potenza



irradiata avviene utilizzando alcuni parametri tra cui il coefficiente per gli effetti di assorbimento prodotti dall'atmosfera terrestre, Fraction Heat Rated (valutabile in funzione dell'area, delle dimensioni e della luminosità della fiamma), dal calore irraggiato e dalla distanza dal punto di osservazione che risulta fondamentale per la definizione del modello.

Parallelamente alle problematiche connesse all'irraggiamento diretto della fiamma sulle strutture circostanti, gli altri aspetti da considerare trattati nella norma [2] per la corretta progettazione impiantistica del sistema interessano i requisiti per una combustione sicura, ovvero senza rischi di spegnimento e con ancoraggio alla sommità della testa, la realizzazione di sistemi idraulici per le valvole di ammissione del gas da bruciare, degli ausiliari e del vapore per la promozione di turbolenza e il dimensionamento dei sistemi rimozione condensa. La norma pone particolare attenzione sulle problematiche connesse a ingressi indesiderati di aria (chiamati rientri), che possono essere causa di detonazioni localizzate all'interno delle condotte di adduzione del gas.

Per garantire una combustione efficace e continua è necessario concentrarsi su alcuni elementi; nello specifico sul sistema di fiamma pilota – sia da un punto di vista strutturale che di monitoraggio/controllo attivo, sulle geometrie degli iniettori e sui sistemi di stabilizzazione della fiamma. Il numero di fiamme pilota dipende dal tipo e dalle dimensioni del bruciatore. E' buona norma utilizzare sistemi che garantiscono una premiscelazione del gas e dell'aria ad un'estremità di un tubo, così da arrivare con le migliori condizioni stechiometriche sulla bocca della torcia dove viene innescata la fiamma pilota. Tipicamente tali sistemi sono accoppiati con dei monitor per controllare il processo.

Le condizioni di combustione ottimale sono fortemente connesse anche alla velocità di efflusso del tail gas (indicativamente con valori di Mach compresi tra 0.2-0.5). A livello industriale, si cerca infatti di sfruttare la massima velocità di uscita disponibile e di ridurre le dimensioni dell'ugello di scarico, avendo contemporaneamente un miglioramento del fenomeno e una corrispettiva diminuzione dei costi di realizzazione e di manutenzione della struttura. La velocità in uscita migliora il miscelamento dell'aria riducendo i fenomeni di combustione sporca ma al contempo, come meglio discusso in seguito,

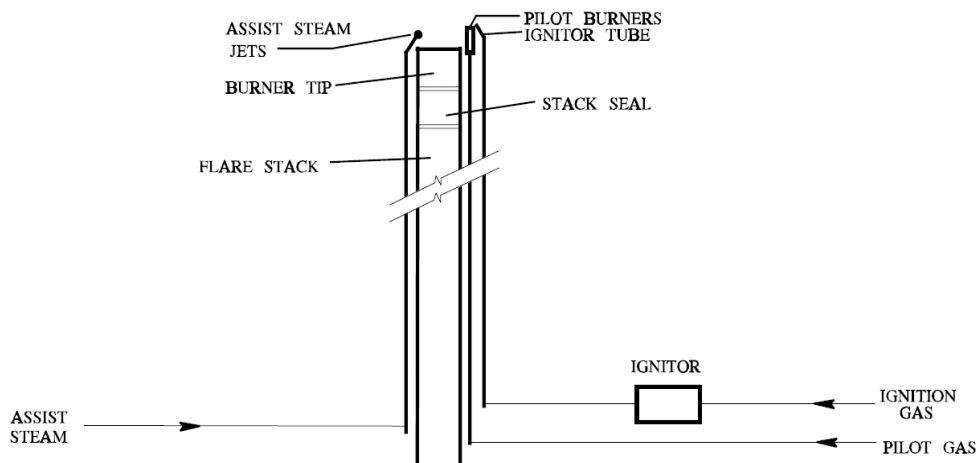
condiziona fortemente la lunghezza della fiamma prodotta. La velocità di immissione va controllata anche in funzione dalle quantità di inerti presenti nel tail gas combusto.

Per quanto riguarda invece le ingestioni di aria da parte del sistema, queste sono particolarmente pericolose per la possibilità di ritorni di fiamma e detonazioni non desiderate all'interno della torcia. I punti di ingresso critici sono tipicamente la zona di uscita del gas dalla torcia, eventuali fessure lungo le tubature o nelle connessioni oppure come residuo presente nel gas di alimentazione della torcia. Per risolvere il problema tipicamente viene immesso del “purge gas”, ovvero un inerte che permette un lavaggio delle condotte sia in fase di accensione che in fase di spegnimento - particolarmente critica – del sistema.

Allo stesso tempo, l'indispensabile attenzione verso la riduzione dell'impatto ambientale di tali strutture sottolinea la necessità di introdurre comunque dei sistemi dedicati alla riduzione di tali manifestazioni indesiderate. Prima tra tutti è la necessaria soppressione del fumo nero sulla fiamma (smoke) tramite promozione di turbolenza localizzata sulla testa della torcia; allo stesso modo sia il rumore prodotto dall'attività del sistema che la visibilità della fiamma richiedono particolari accorgimenti tecnici che saranno meglio affrontati a seguire.

**1.8 DEFINIZIONE DELLA TIPOLOGIA DI TORCE SU CUI DIMENSIONARE IL BANCO PROVA**

Al termine di tale analisi, sulla base della valutazione dei requisiti degli impianti petrolchimici più diffusi e dell'analisi dei principi di funzionamento, è stata definita la configurazione della tipologia di torce scalate studiate all'interno del banco di prova realizzato

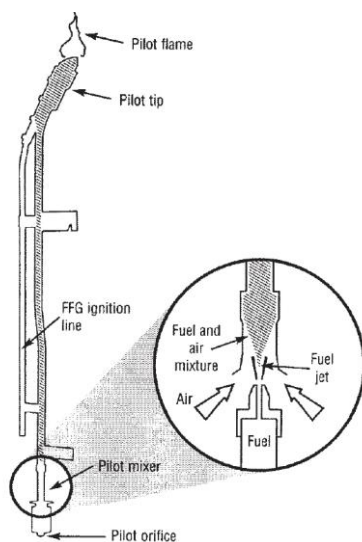


**Figura 3: Configurazione della torcia per tail gas**

Tale configurazione standard (Figura 3) prevede una torcia sulla cui sommità (tip) è situato un bruciatore dotato di fiamma pilota e di un dispositivo di accensione, oltre che di un getto di vapore o di gas inerte necessario ad accelerare il flusso del tail gas in uscita dalla torcia e migliorare il miscelamento dei reagenti.

Da un punto di vista del contenimento delle emissioni inquinanti e della limitazione delle emissioni radianti al suolo, l'analisi svolta ha dimostrato che l'elemento fondamentale di questa configurazione di torcia è il cosiddetto "tip", caratterizzato dal sistema di stabilizzazione della fiamma in corrispondenza della sommità della torcia stessa. Occorre infatti sottolineare che nella configurazione sopra descritta, la fiamma viene ancorata nei pressi della sommità della torcia attraverso l'adozione di un certo numero di bruciatori pilota disposti attorno all'asse dello stack. I bruciatori pilota vengono alimentati da un gas diverso dal tail gas al fine di sopperire allo scarso potere calorifico di tale combustibile e all'eventuale bassa velocità di propagazione della fiamma che pregiudicherebbero la stabilità della combustione.

I bruciatori pilota sono tipicamente basati sull'uso di fiamme premiscelate (a composizione stechiometrica o ricca); anche se meglio discusso nei capitoli successivi, di seguito è riportato lo schema (Figura 4) semplificato del bruciatore pilota di cui è stato studiato il funzionamento nelle attività successive del progetto.



**Figura 4: Bruciatore pilota**

Come sopra esplicitato, l'analisi teorica svolta indica che gli aspetti critici ai fini del contenimento delle emissioni di gas inquinanti e della potenza termica radiante al suolo sono rappresentati fondamentalmente da:

- Il sistema di accensione (Flame Front Generator o Spark Ignition)
- La stabilità della fiamma all'azione degli agenti atmosferici esterni (vento o pioggia)
- L'efficienza complessiva della combustione ai fini del contenimento della potenza termica d'esercizio

Il funzionamento generale della torcia prevede quindi il continuo apporto di una sorgente di accensione al tail gas costituita dal calore rilasciato dalle fiamme pilota.

*1.9 STUDIO DELLA FIAMMA PRODOTTA DA TORCE INDUSTRIALI E DEFINIZIONE DEI MODELLI NUMERICI*

In collaborazione con altri ricercatori del dipartimento di Energetica “S.Stecco” che operano specificatamente nel settore della modellistica numerica dedicata alla combustione, nel presente lavoro è stata svolta un’accurata analisi teorica mirata a determinare le caratteristiche del campo di moto relativo alla fiamma prodotta da torce industriali. In base a quanto valutato – meglio presentato nei paragrafi successivi - è risultato che la struttura complessiva di tale campo di moto è caratterizzata dall’insorgenza di un fenomeno di lift della fiamma principale, che è quindi stabilizzata ad una certa distanza a valle del tip dello stack, ovvero in una zona nella quale il calore rilasciato dalle fiamme pilota e la miscelazione del tail gas con l’aria esterna determinano condizioni idonee all’accensione e alla stabilizzazione della fiamma.

Gli elementi sopra sintetizzati derivanti dall’analisi teorica svolta nel corso dell’attività di ricerca, hanno permesso di identificare gli aspetti e i dispositivi da approfondire con l’analisi numerica CFD. Questi sono così riassumibili in due sottosistemi primari:

- la tipologia e struttura della fiamma adottata come sistema di accensione e stabilizzazione del processo (fiamma pilota);
- l’interazione tra la fiamma pilota e la fiamma principale del tail gas finalizzata alla caratterizzazione del lift di quest’ultima.

Per analizzare in dettaglio questi aspetti ed ottenere quindi indicazioni precise su come studiare torce innovative caratterizzate da un livello di emissione di inquinanti, di potenza radiante al suolo e sonora in linea con lo stato dell’arte, si è optato per lo studio di un sistema integrato di tipo CFD con le seguenti caratteristiche e funzionalità:

- discretizzazione ai volumi finiti su mesh non strutturate di tipo poliedrico;
- formulazione stazionaria RANS
- Uso di modelli di turbolenza a due equazioni

- risoluzione di sistemi a conservazione di scalari aggiuntivi necessari alla definizione di modelli di combustione aggiuntivi.

Sulla base di quanto detto, tale studio è stato svolto su due livelli paralleli: da un lato si è analizzato il problema delle fiamme pilota e dall'altro quello della stabilizzazione della fiamme principale; nei paragrafi seguenti si descrive il lavoro svolto su ciascuna di tali problematiche.

#### *1.9.1 SELEZIONE DI UN MODELLO PER LO STUDIO DELLE FIAMMA PILOTA*

Come accennato in precedenza, lo studio svolto sulle fiamme pilota ha permesso di optare per una soluzione a fiamme premiscelate che garantisca la massima stabilità e compattezza della zona di rilascio termico. Va altresì aggiunto che la stabilità e l'efficienza della fiamma pilota è largamente incrementata se si opera in regime turbolento in quanto l'aumento delle proprietà di trasporto determinato dall'agitazione indotta da tale regime produce una maggiore intensità di combustione permettendo di ottenere fiamme più stabili.

Da un punto di vista numerico lo studio delle fiamme premiscelate turbolente richiede la caratterizzazione accurata di numerosi fenomeni. Risulta infatti indispensabile, oltre alla definizione chimica del processo di combustione e alla valutazione del campo tridimensionale di velocità e turbolenza, modellare l'effetto della turbolenza stessa sul processo reattivo. I criteri adottati per la definizione di questi effetti definiscono il modello di combustione turbolenta adottato.

Per lo studio dei bruciatori pilota, in particolare, è stato preso in considerazione un modello basato sull'impiego di una variabile di progresso, così definita (formalismo di Bay-Moss-Libby):

$$c = \frac{T - T_u}{T_b - T_u}$$

Dove:

- T rappresenta la temperatura di fiamma
- $T_u$  e  $T_b$  rappresentano rispettivamente le temperature agli stati unburned e burned

Ne consegue che in questo modello la condizione  $c=0$  identifica i gas incombusti mentre con  $c=1$  si individuano i gas bruciati. Il modello prevede la soluzione di un'equazione di trasporto per lo scalare  $c$  in cui il termine di produzione  $w_c$  è determinato sulla base delle considerazioni d'interazione turbolenza-combustione espresse dal teorema di Kolmogorov-Petrskii-Piskunov. La caratterizzazione chimica degli stati burned e unburned viene effettuata esternamente alla soluzione CFD ed è tabulata in opportune "Look-Up-Tables".

#### *1.9.2 SELEZIONE DI UN MODELLO DI INTERAZIONE DELLA FIAMMA PILOTA CON LA FIAMMA PRINCIPALE*

Per poter caratterizzare tutte le complesse relazioni che interessano il sistema di interazione tra le fiamme pilota e il la fiamma principale del tail gas, occorre riferirsi ad una formulazione diversa rispetto al modello descritto in precedenza.

Va innanzi tutto sottolineato che in questo contesto è impossibile definire un regime univoco di combustione. Infatti la fiamma determinata dall' interazione tra una fiamma premiscelata ed un getto di combustibile viene comunemente detta "fiamma tripla", a causa della mutua influenza tra i due flussi.

Ne consegue che l'impiego della variabile di progresso  $c$  definita in precedenza perde di significato in quanto non è più in grado di descrivere univocamente l'evoluzione del processo. Si è fatto, pertanto, ricorso a modelli di combustione che operano una soluzione diretta di tutte le specie coinvolte. Ne consegue che, in base alla complessità del meccanismo di reazione selezionato (fino a decine di specie chimiche coinvolte con centinaia di reazione in gioco) la simulazione derivante dall'impiego di questo modello può risultare particolarmente onerosa in termini di risorse di calcolo e quindi di tempi.

Per poter caratterizzare poi il ritardo di accensione dovuto al mixing tra i prodotti di reazione dei bruciatori pilota ed il getto di tail gas, occorre introdurre una chiusura dell'interazione tra la turbolenza e la combustione che richiede, per ogni cella di calcolo, la soluzione di un reattore chimico equivalente. Al termine di questa linea della ricerca è stato selezionato il modello usualmente identificato come "*Eddy Dissipation Concept*" (EDC).

### 1.10 ELEMENTI CARATTERIZZANTI DEL MODELLO DI COMBUSTIONE

La configurazione del sistema analizzato prevede un'iniezione principale di combustibile (*main*) e una secondaria (*pilot*) in un *co-flow* d'aria a bassa velocità. La fiamma risultante è di tipo diffusivo. Per affrontare con maggiore cognizione di causa il fenomeno, sono state analizzate, e di seguito sono riportate, le basi teoriche per lo studio delle suddette tipologie di fiamma. I paragrafi successivi descrivono le caratteristiche fenomenologiche delle fiamme diffusive laminari e quindi di quelle turbolente, evidenziando i parametri chiave per una corretta modellistica delle stesse e per la stima dei principali effetti.

#### 1.10.1 FIAMMA DIFFUSIVA LAMINARE

Il modello presentato di seguito illustra la struttura diffusiva monodimensionale laminare rappresentativa del comportamento locale all'interno di una fiamma turbolenta. In questa struttura combustibile e ossidante, si posizionano ai due lati della zona di massimo rilascio termico: la velocità con cui il calore è rilasciato è controllata dalla diffusione molecolare tra i reagenti che si avvicinano alla zona stessa. In condizioni stazionarie, rappresentate da due getti contrapposti di combustibile e ossidante con velocità fissata, il calore trasportato bilancia quello rilasciato dalle reazioni chimiche. La fiamma diffusiva non possiede un'intrinseca velocità di propagazione ma si stabilizza mediante miscelazione tra i reagenti: ne consegue che un aumento eccessivo della velocità dei getti può portare allo spegnimento. In Figura 5 si riporta lo schema tipico di una fiamma diffusiva ottenuta mediante getti contrapposti.

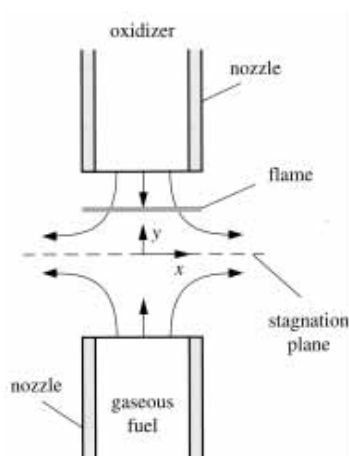


Figura 5: Fiamma diffusiva da getti contrapposti di velocità note



In generale, la struttura di una fiamma diffusiva laminare dipende dal rapporto tra i tempi caratteristici della diffusione molecolare e della cinetica chimica. In Figura 6 si riporta la struttura tipica di una fiamma diffusiva, in cui si distinguono la zona di reazione, quindi di rilascio termico, e le due zone di diffusione verso il combustibile e verso l'ossidante.

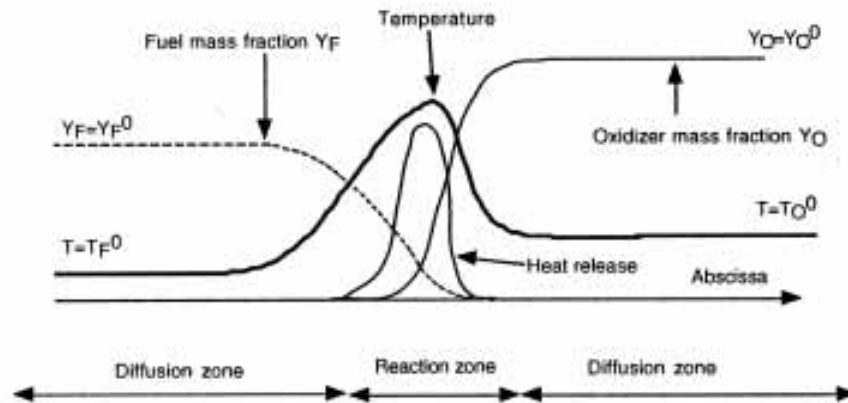


Figura 6: Generica struttura di una fiamma diffusiva laminare

La struttura interna di una fiamma diffusiva è usualmente descritta da uno scalare non reattivo ottenuto combinando le equazioni di trasporto per le specie combustibile e ossidante: la mixture fraction,  $Z$ , che varia attraverso lo strato diffusivo da zero (100% ossidante) a uno (100% combustibile). In Figura 7 si mostrano temperatura e composizione di una fiamma laminare diffusiva in funzione della mixture fraction.

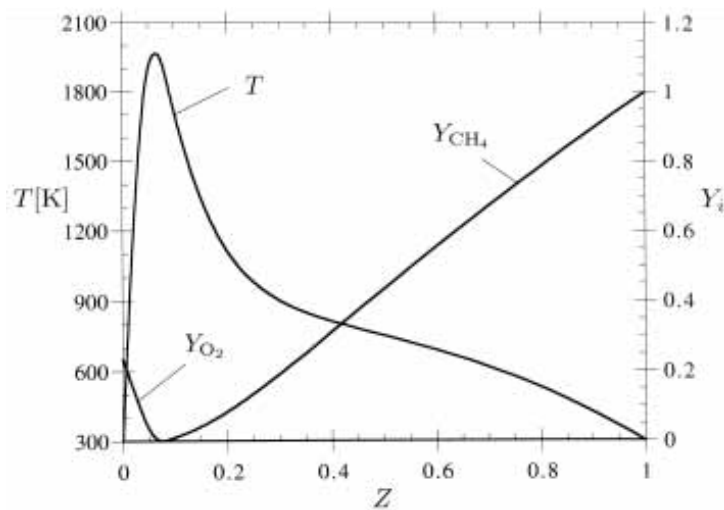


Figura 7: Temperatura e composizione di una fiamma diffusiva laminare in funzione della mixture fraction  $Z$

Come detto, la struttura di una fiamma diffusiva laminare dipende dal rapporto tra i tempi caratteristici della diffusione molecolare e della cinetica chimica. Secondo il suddetto rapporto si può assumere reazioni infinitamente veloci, a velocità finita o puro miscelamento: in Figura 8 sono riportati i possibili casi.

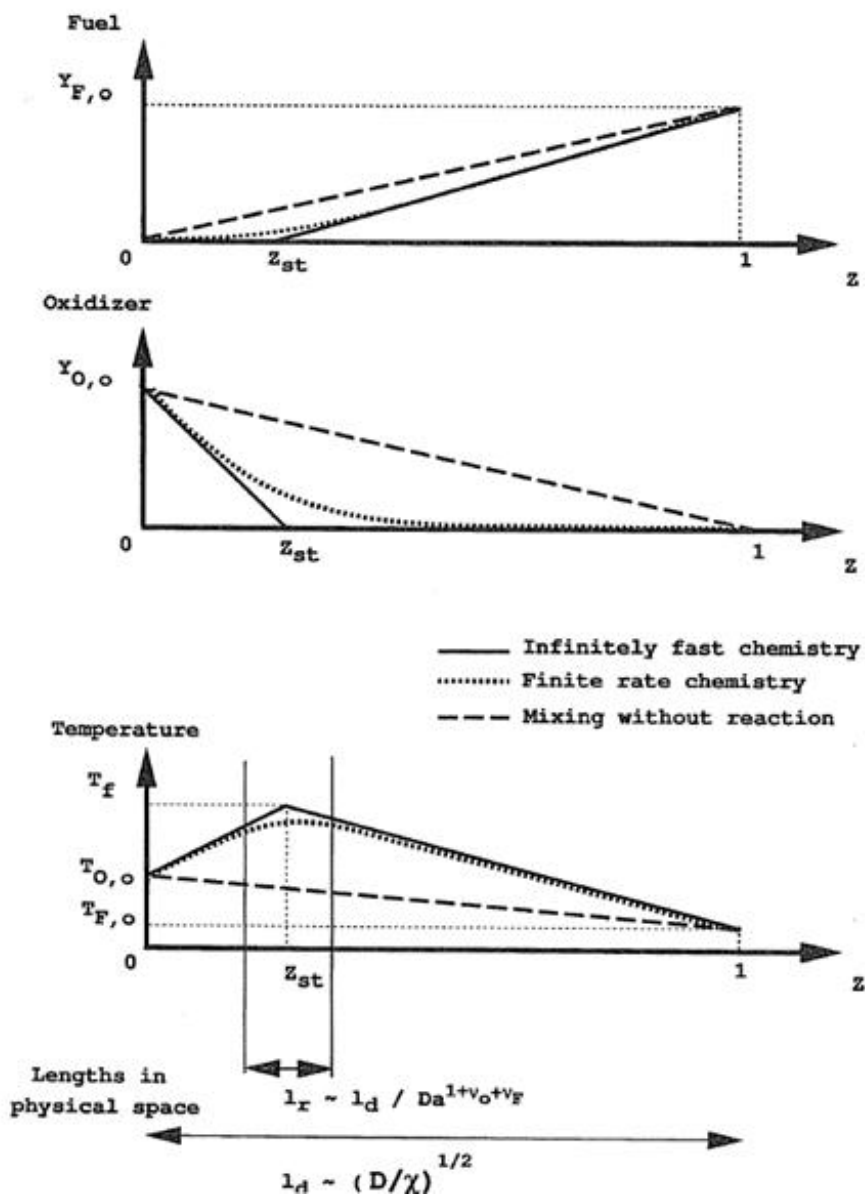


Figura 8: Temperatura e composizione di una fiamma diffusiva laminare in funzione della mixture fraction  $Z$

Lo struttura della fiamma è legata allo scalar dissipation rate,  $\chi$ , proporzionale al quadrato del gradiente della mixture fraction: rappresentando l'inverso del tempo caratteristico della diffusione, regola il globale processo di miscelazione.

1.10.2 FIAMMA DIFFUSIVA TURBOLENTA

Se in una fiamma diffusiva laminare è ben definito il rapporto tra i tempi caratteristici della diffusione molecolare e della cinetica chimica, la soluzione di una fiamma diffusiva turbolenta richiede modellazione dell'instazionarietà del flusso, che si sviluppa in due modi:

- La mixture fraction non risponde immediatamente alle fluttuazioni di velocità, portando ad una distribuzione di scalar dissipation rates per diversi valori del gradiente di velocità intorno alla zona stechiometrica: questo risulta essere l'effetto dominante nel caso di chimica molto veloce.
- Una velocità di reazione finita porta ad un secondo livello di instazionarietà, non riuscendo a seguire le fluttuazioni di scalar dissipation rate.

Il mixing turbolento è guidato dalla varianza della mixture fraction,  $Z'^2$ , che ne definisce la distribuzione attorno al valor medio. In Figura 9, si riporta uno schema di una fiamma diffusiva turbolenta, in cui si evidenziano lunghezze caratteristiche rispettivamente della turbolenza,  $l_t$ , e del mixing,  $l_d$ , che determina lo spessore della fiamma.

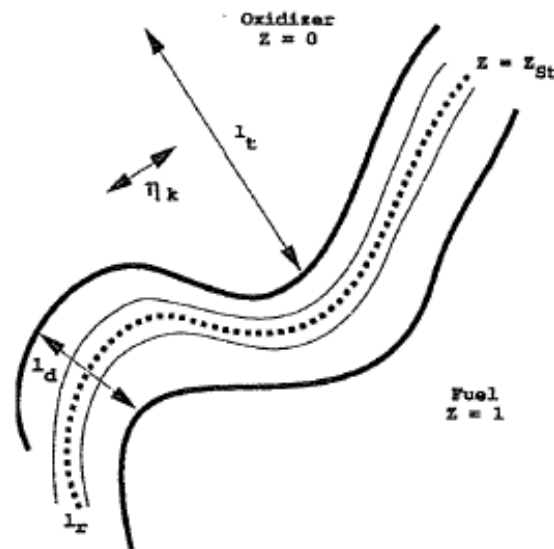


Figura 9: Schema di una fiamma diffusiva turbolenta

Riassumendo, è possibile classificare le fiamme diffusive avvalendosi della definizione del numero di Damköhler turbolento,  $Da$ , dato dal rapporto tra il tempo caratteristico della turbolenza e della cinetica chimica. In Figura 10 si riporta il diagramma riepilogativo.

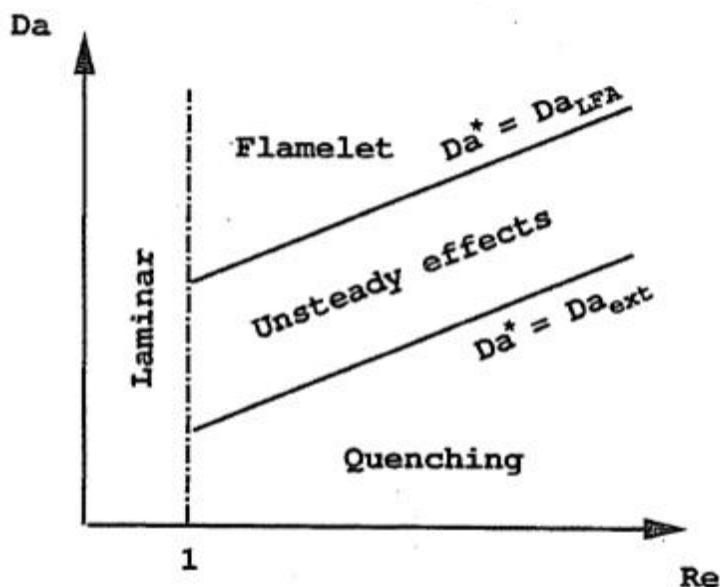


Figura 10: Diagramma dei regimi di combustione diffusiva

Si può osservare come, per chimica infinitamente veloce, quindi per  $Da \gg 1$ , la turbolenza è responsabile del grado di completamento della reazione instaurando così il regime *flamelet*: in un suddetto regime, la fiamma mantiene la struttura di una somma di strati reattivo-diffusivi, detti flamelet, (fiamme laminari). È quindi possibile disaccoppiare la soluzione chimica da quella turbolenta: partendo da  $\chi$  nullo, si passa da una condizione di reazione all'equilibrio a spegnimento (quenching).

*1.11 CRITERI DI DIMENSIONAMENTO PER BANCHI SPERIMENTALI – GALLERIA DEL VENTO CALDA*

L'analisi preliminare sul funzionamento e sull'impiantistica dei sistemi di torce industriali ha permesso di individuare tutte le peculiarità che i dispositivi da testare all'interno del banco prova dovessero rispettare. Il progetto si è quindi inizialmente spostato sulla definizione e sull'allestimento di un banco prova sperimentale da realizzarsi appositamente per effettuare il tipo di misure in questione. Tuttavia, come già ribadito in precedenza, la carenza in letteratura scientifica di divulgazioni dettagliate su questo tipo di soluzioni tecniche, ha richiesto un approccio fortemente progettuale al problema. Dovendo quindi definire l'intero sistema di studio, la ricerca si è spostata verso soluzioni analoghe già presenti in altri contesti. Ad oggi nel mondo esistono solo pochissimi flare test facilities e i più di questi sono proprietà di aziende leader nel settore, e quindi coperte da segreto industriale. Tuttavia, anche se con dimensioni molto differenti, sia della camera che del fenomeno in termini di fiamma sviluppata durante il test, nell'ambito delle gallerie del vento sono state trovate delle analogie che hanno permesso di individuare dei criteri preliminari per un primo dimensionamento. La galleria in questione è stata sviluppata dall'Università dell'Alberta (Canada).

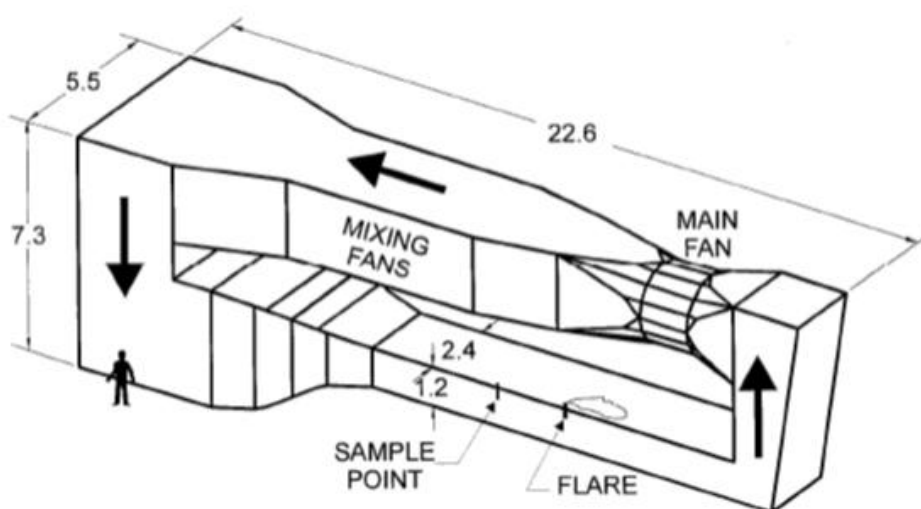
Quanto ricavato - e riportato nel paragrafo successivo - fa riferimento allo sviluppo di una galleria del vento calda (quindi con una combustione in aria al suo interno) per lo studio della risposta dei fronti di fiamma assimilabili a quelli di torce industriali di fronte a flussi trasversali. Questa galleria nasce tipicamente per fare uno studio teorico delle emissioni prodotte da un determinato tipo di combustione e per una valutazione delle conformazioni che la fiamma assume alla presenza di flussi d'aria trasversali.

Il paragrafo che segue descrive le caratteristiche, sia in termini di architettura che di strumentazione utilizzata, della sopracitata galleria.

### 1.12 GALLERIA DEL VENTO DELL'UNIVERSITÀ DELL'ALBERTA (FLARE TEST RIG)

Quanto presentato in questo paragrafo fa riferimento alla galleria del vento sviluppata presso l'università dell'Alberta ed è servito per sviluppare un criterio di dimensionamento del banco prova realizzato presso G.A.M. Oil&Gas. La galleria dell'Alberta è un tunnel ad anello chiuso (Figura 11). La struttura presenta un ingombro totale di 7.3 x 5.5 x 22.6 m ed è composta da due condotti sovrapposti:

- una sezione superiore a bassa velocità (2.5m x 2.5m)
- una sezione inferiore ad alta velocità (1.22m x 2.44m)



**Figura 11: Ingombri della galleria del vento calda dell'Università dell'Alberta.**

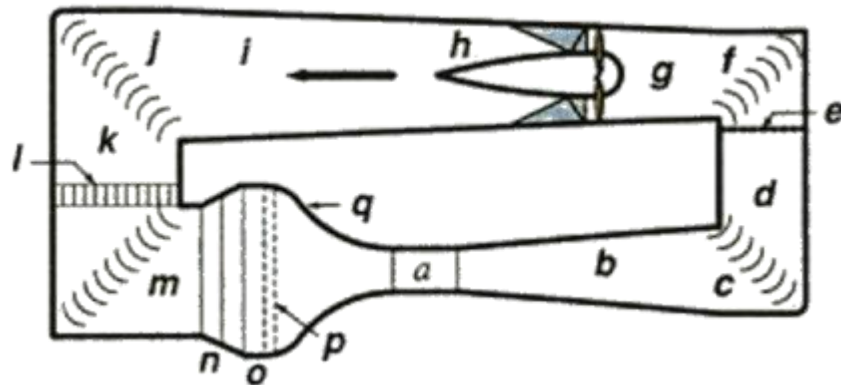
Il tunnel è alimentato con un motore elettrico 200 HP DC in grado di produrre aria a velocità superiori di 36 m/s nella zona bassa del tunnel. La Figura 12 mostra una vista laterale della galleria, individuandone delle zone caratteristiche.

La struttura, essendo fondamentalmente un banco prova per fiamme libere, necessita di numerosi accorgimenti impiantistici che la differenziano da una classica galleria del vento. Concettualmente il banco presenta le seguenti parti:

- Ventilatori aspiranti per rimuovere i prodotti della combustione dal tunnel.
- Un sistema per individuare eventuali fughe di gas per prevenire rischi di esplosioni o fughe.
- Un tetto ceramico per prevenire l'incendio e il crollo del tetto.

- Installazione di una finestra (accesso ottico) per permettere l'analisi qualitativa e l'acquisizione con strumenti ottici della fiamma
- Una traversa mobile per permettere la ricostruzione computazionale del pennacchio oltre che misure locali di temperatura ed efficienza
- Installazione di numerosi accessi per misure di temperatura, velocità del vento, portata del gas, concentrazioni delle specie ed altro.

Con riferimento alla Figura 12, una configurazione di tipo generale per una galleria a circuito chiuso, include i seguenti elementi:



**Figura 12: Sezione della galleria del vento calda dell'Università dell'Alberta**

- a) camera di prova, che può essere chiusa, aperta, parzialmente aperta o convertibile.
- b) diffusore, la cui lunghezza deve essere almeno 3-4 volte la lunghezza della camera di prova.
- c) prima curva, con deflettori aerodinamici
- d) tratto a sezione costante o prolungamento del diffusore
- e) griglie di sicurezza a protezione della ventola, normalmente a ridosso della seconda curva
- f) seconda curva, con deflettori aerodinamici
- g) transizione da sezione rettangolare a sezione circolare all'imbocco della ventola
- h) ventola e sezione di raddrizzamento

- i) secondo tratto del diffusore, che normalmente include la transizione di ritorno da sezione circolare a sezione rettangolare
- j) terza curva, con deflettori aerodinamici
- k) tratto a sezione costante
- l) scambiatore di calore
- m) quarta curva, con deflettori aerodinamici
- n) diffusore ad ampio angolo con griglie di controllo della separazione (screen mesh)
- o) camera di calma
- p) raddrizzatori di flusso e griglie di controllo della turbolenza (honeycombs)
- q) convergente

Questa struttura, come sopra già sottolineato, nasce per effettuare misure sulle concentrazioni di inquinanti prodotte dalla combustione di flare gas. Le dimensioni stesse del sistema però richiedono una forte scalatura delle strutture, costringendo ad un'inevitabile perdita di dettaglio realizzativo sulla testa della torcia e sui sistemi ausiliari. Tuttavia le dimensioni contenute del fenomeno di combustione generato in condizioni controllate, permettono l'inserimento di sensoristica dedicata al campionamento, all'acquisizione degli inquinanti e all'analisi della cinetica di combustione, fornendo importanti dati sperimentali per la sua caratterizzazione. Per misurare l'efficienza della torcia, la si accende nella sezione bassa della galleria; quindi ne viene osservato l'accumulo delle concentrazioni delle varie specie chimiche coinvolte nella reazione nelle varie parti del tunnel. Tipicamente la torcia brucia metano, gas naturale, propano o combinazioni di questi con aggiunto ossido di carbonio e azoto. Talvolta, al fine di ottenere simulazioni maggiormente accurate, viene immesso nella corrente gassosa delle gocce liquide per simulare la formazione di condensa di combustibile, così da causare una combustione sporca con formazione di fumo.



La torcia è innescata con una fiamma pilota alimentata ad idrogeno. Come visibile dalle foto riportate in Figura 13, la galleria è stata progettata per studiare gli effetti prodotti dal vento sulla fiamma libera di torce industriali; per generare la turbolenza lungo il condotto sono inseriti dei promotori di turbolenza.



**Figura 13: Effetti del vento sulla fiamma all'interno de banco prova dell'Università dell'Alberta**

#### *1.12.1 STRUMENTAZIONE PER MISURE*

Il punto di forza della galleria messa a punto dall'università dell'Alberta non è tanto la modellizzazione delle geometrie del tip della torcia, quanto l'analisi delle emissioni da parte di determinati tail gases prodotti da attività industriale. La strumentazione di misura in essa inserita permette di effettuare rilevazioni in tempo reale sulle emissioni prodotte all'interno della galleria.

Il banco è attrezzato con 7 analizzatori di gas disposti in parallelo in grado di rilevare idrocarburi, ossido di carbonio, monossido di carbonio, ossigeno, azoto e la presenza di vapore secondo le tecniche di misura sotto elencate:

- Idrocarburi – FID (Flame Ionization Detector)
- Ossido Di Carbonio – NDIR (Non-Dispersive Infrared)
- Monossido Di Carbonio – NDIR (Non-Dispersive Infrared)
- Ossigeno – PMD (Paramagnetic Detector)
- Ossidi di Azoto – Chemiluminescenza

Per ottenere misure di velocità e di temperatura, il banco è equipaggiato con diversi tubi di Pitot e anemometri in grado di effettuare rilevamenti in punti differenti nelle varie sezioni del condotto. Le temperature sono misurate usando un trasduttore AD590 a corrente costante e numerose termocoppie (Figura 14).

Misure maggiormente accurate sulla turbolenza e sul flusso, vengono effettuate con un sistema di tipo Laser Doppler e anemometri a filo caldo. Tale sistema di misura è allestito su un braccio mobile ortogonale allo sviluppo della galleria e controllato da un computer. Le stime della portata sul gas vengono effettuate usando misuratori volumetrici, permettendone una misura molto accurata. Il sistema è equipaggiato con valvole a controllo elettronico, lasciando così la possibilità di ottenere anche piccole variazioni di portata. Anche se i misuratori sono calibrati per la regolazione delle portate di gas naturale, propano, metano, aria, ossido di carbonio, e azoto, il sistema permette riconfigurazioni per diverse esigenze. Inoltre, per ottenere misure sul campo di moto, un sistema PIV (Particle Image Velocimeter) ottenuto con un laser di tipo Nd:YAG da 400 mJ/pulse è inserito nella galleria. Un sistema laser a diffrazione è utilizzato poi per la caratterizzazione della distribuzione delle dimensioni delle gocce di condensa formate nella vena principale da quenching locale; queste vengono simulate nebulizzando nella vena combustibile liquido.



**Figura 14: Misure di velocità e di temperatura**

In termini di sistema di acquisizioni, la galleria è attrezzata con processori di uso comune (superiori a Pentium II 400 MHz) su cui viene fatto girare il software LabView (National Instruments). Il computer riceve dati da tutti i sensori attraverso tre distinte schede di acquisizione. Tramite software vengono controllate le elettro valvole, i ventilatori e le pompe, in questo modo il banco permette rapide riconfigurazioni del sistema senza dover impegnare tempi eccessivamente lunghi.

Le informazioni sopra riportate, ci hanno permesso di individuare le peculiarità che il banco da sviluppare presso G.A.M. Oil&Gas dovesse avere per ottenere un sistema di prova che fosse degno di una sperimentazione scientifica opportuna per lo studio del funzionamento di torce industriali. E' stato quindi indispensabile individuare delle linee guida che facilitassero il dimensionamento e la valutazione delle grandezze adimensionali necessarie alla caratterizzazione della camera. Queste, come ampiamente trattato nel paragrafo seguente, sono state estrapolate seguendo il metodo di approccio utilizzato dai ricercatori dell'Università dell'Alberta per sviluppare la loro galleria.

### *1.13 LINEE GUIDA PER IL DIMENSIONAMENTO DELLA CAMERA [3][4]*

Le grandezze individuate e sotto riportate, hanno permesso di definire i criteri per il primo dimensionamento del sistema. Per completezza al lavoro svolto, il paragrafo che segue li illustra brevemente, così da permettere una più agile comprensione delle successive scelte progettuali fatte per ottenere la realizzazione della camera di test per torce industriali presso G.A.M. Oil&Gas.

#### *1.13.1 DIMENSIONAMENTO DELLA CAMERA DI PROVA*

Il dimensionamento fluidodinamico è il punto di partenza nella progettazione di una qualsivoglia galleria del vento. La scelta finale deve tenere conto, di diversi fattori come il costo, lo spazio disponibile, il tempo di realizzazione, le tipologie di prova a cui il tunnel deve essere destinato.

Indipendentemente dal tipo di impiego del tunnel (caldo o freddo), si possono avere due configurazioni di base (con alcune varianti): circuito chiuso e circuito aperto. Entrambe le configurazioni presentano vantaggi e svantaggi. I tunnel a circuito aperto sono sensibili alle variazioni delle condizioni esterne alla galleria (flusso in aspirazione, distorsioni del flusso allo scarico ecc.) sono inoltre più sensibili alle contaminazioni da polvere, che possono creare problemi con le sonde anemometriche, data la delicatezza del filo caldo del diametro di pochi micron. Hanno però il vantaggio di avere dimensioni più ridotte e di non richiedere particolari sistemi di refrigerazione. Le gallerie a circuito chiuso sono invece meno sensibili alle condizioni esterne alla galleria stessa, ma hanno lo

svantaggio di essere più ingombranti e di richiedere, a seconda della potenza installata, dei sistemi di refrigerazione.

### *1.13.2 NUMERO DI REYNOLDS*

Uno dei fattori principali di cui tenere conto nel dimensionamento di una galleria del vento a bassa velocità è il numero di Reynolds [a1] definito come:

$$Re = \frac{\rho V l}{\mu} \quad [a1]$$

dove  $\rho$  è la densità del fluido,  $V$  la velocità,  $l$  è la grandezza idraulica del condotto e  $\mu$  è la viscosità dinamica. Per analizzare a livello fluidodinamico il problema, è fondamentale determinare il valore minimo accettabile del numero di Reynolds così da avere una stima delle condizioni del flusso operante all'interno della camera. Tuttavia non esiste una regola precisa per determinare tale valore, essendo il numero di Reynolds legato al tipo di modello. Bradshaw e Pankhurst suggeriscono che il numero di Reynolds [b1]:

$$Re = \frac{\rho V \delta}{\mu} \quad [b1]$$

basato sullo spessore della quantità di moto dello strato limite laminare, preso nel punto di pressione minima sul corpo testato, sia di almeno 320. Il significato di questo parametro (momentum thickness) è un indice di quanta quantità di moto va persa a causa dell'attrito superficiale. Questo valore è quindi considerato come il minimo per cui possa esistere uno strato limite turbolento completamente sviluppato.

### *1.13.3 CONSIDERAZIONI DI TIPO ENERGETICO PER IL DIMENSIONAMENTO DEL BANCO*

E' necessario soffermarsi su alcune considerazioni generali relative al consumo energetico dei vari elementi costitutivi di una galleria del vento a circuito chiuso. Nonostante la trattazione sia concepita per analisi monodimensionali, per quanto questo possa portare ad alcune ambiguità ed inaccuratezze, i risultati che possono essere messi in evidenza risultano sperimentalmente accettabili per la

comprensione del comportamento di un flusso in un tunnel [4]. La maggior parte delle gallerie è progettata assumendo tali presupposti monodimensionali.

E' così necessario definire alcune grandezze:

*a) Potenza del flusso*

La potenza del flusso in camera di prova può essere espressa in termini di densità ( $\rho_t$ ), area della sezione di prova ( $A_t$ ) e velocità del flusso ( $V_t$ ) nella stessa, secondo l'espressione [c1]:

$$P_t = \frac{\rho_t V_t^3 A_t}{2} = \frac{\rho_t A_t V_t^3}{2} \quad [c1]$$

*b) Rapporto di potenza (energy ratio)*

Il rapporto di potenza  $E_r$  fra la potenza nella sezione di prova  $P_t$  e la perdita di potenza ( o perdite di carico)  $P_c$  nel circuito è definito come[d1]:

$$E_r = \frac{P_t}{P_c} \quad [d1]$$

Tale rapporto può essere considerato un indice dell'efficienza energetica del tunnel. Il valore di  $E_r$  per circuiti di tipo chiuso è tipicamente sempre maggiore di 1, generalmente nel range 3÷7. Per valutarne correttamente il valore, esamineremo ora dei metodi di bilancio energetico nelle varie sezioni del tunnel.

*c) Perdite energetiche nei componenti di una galleria del vento*

Secondo Wattendorf [4] le perdite in un tunnel a circuito chiuso possono essere suddivise e analizzate nelle diverse sezioni del tunnel:

- 1) tratti a sezione costante
- 2) curve
- 3) diffusori
- 4) convergenti
- 5) raddrizzatori

6) ventola

Quest'ultima zona (6) merita considerazioni a parte, in quanto in quel tratto della banco prova, il motore cede calore all'aria, sia a causa della sua efficienza non unitaria, sia perché le pale del motore mettono in rotazione il fluido; quando questa rotazione viene meno causa spegnimento del motore, si ha un'ulteriore degradazione di energia meccanica in calore per effetto della viscosità. In ognuna delle altre sezioni l'energia meccanica è degradata invece in calore per effetto dell'azione di attrito tra il fluido e le pareti; tale calore aumenta la temperatura del fluido. Considerando il fluido immesso nella camera come un flusso incomprimibile, l'equazione di Bernoulli è esprimibile nella forma [e1]:

$$P_{totale} = \frac{\rho V^2}{2} + P_{statica} = costante \quad [e1]$$

Se questa viene applicata tra due punti di un condotto, risulterebbe valida solo se non esistessero perdite di carico tra le sezioni (flusso inviscido). Nel caso reale questo avviene sempre, quindi nell'equazione bisogna tenere conto di tale variazione. La legge di continuità per un fluido incomprimibile, formalizzabile come [f1]:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad [f1]$$

(dove  $A_i$  e  $V_i$  sono rispettivamente l'area e la velocità del flusso nella sezione  $i$ ) vincola la velocità, e quindi la pressione dinamica, a non diminuire nella seconda sezione (con  $A_1 > A_2$ ). Tuttavia, corrispondentemente alle perdite per attrito, ci saranno uguali cadute nel carico statico e nel carico totale.

Lungo il tunnel le perdite avvengono come cadute di pressione successive: la caduta totale di pressione  $\Delta H$  sarà pari all'aumento di pressione richiesto al ventilatore. La perdita locale  $K_l$  è definita come la perdita media di pressione totale sopportata dal flusso attraverso la sezione in esame ed è espressa in forma adimensionale come rapporto tra la caduta di pressione locale e la pressione dinamica all'entrata della stessa sezione [g1]:

$$K_l = \frac{\Delta P_l}{\rho V_1^2 / 2} = \frac{\Delta P_l}{P_{d1}} \quad [g1]$$

Questa definizione di coefficiente di perdita di carico è utile, in quanto sia la perdita totale che la pressione dinamica sono facilmente individuabili. Inoltre la potenza persa in una sezione può essere espressa come il prodotto tra la caduta di pressione totale per la portata volumetrica del flusso attraverso la sezione stessa [h1]:

$$\dot{E}_l = A_1 V_1 \Delta H_l \quad [h1]$$

da cui:

$$\dot{E}_l = A_1 V_1 K_l q_t \quad [i1]$$

ed infine:

$$\Delta H_l = K_l \left( \frac{A_1 V_1^2}{2} \right) \quad [m1]$$

Ovvero, il coefficiente  $K_l$  esprime anche il rapporto tra la caduta energetica e la variazione di energia cinetica nell'unità di tempo attraverso la sezione. Queste perdite locali sono riferibili alla pressione dinamica nella sezione di prova, definendo il coefficiente [n1]:

$$K_l = \frac{\Delta H_l}{q_t} = K_l \frac{q_t}{q_t} \quad [n1]$$

dove  $q_t$  è la pressione dinamica nella sezione di prova. Dalle equazioni precedenti si ottiene [o1]:

$$\Delta H_l = K_l \left( \frac{A_1 V_1^2}{2} \right) = K_l q_t \quad [o1]$$

La potenza totale persa nel circuito si ottiene invece sommando i singoli contributi delle varie sezioni [p1]:

$$P_l = \sum \dot{E}_l = \sum K_l q_t \quad [p1]$$

Questa rappresenta la potenza netta che la ventola deve fornire per mantenere condizioni di flusso stazionarie. Il rapporto energetico  $E_r$  precedentemente definito può essere espresso quindi come [q1]:

$$E_r = \frac{1}{\sum K_i} \quad [q1]$$

Questa definizione esclude le perdite associate alla ventola e al motore.

Si valuta quindi le perdite di carico in una sezione ad area costante. Dallo studio dell'idraulica sappiamo che per un tratto ad area costante vale l'equazione [r1]:

$$\frac{\Delta p}{\rho} = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2} \quad [r1]$$

dove:  $\Delta p$  è la caduta di pressione lungo il tratto di lunghezza  $L$  e diametro idraulico  $D_h$ ,  $V$  è la velocità media del flusso,  $f$  è il coefficiente di attrito e  $\rho$  è la densità del fluido. Il diametro idraulico  $D_h$  è dato dal rapporto  $D_h = 4A/P$ , dove  $A$  è l'area attraversata dal flusso e  $P$  è il perimetro bagnato. Da quanto esposto sopra, avremo per il coefficiente di perdita di carico [s1]:

$$K_i = f \frac{L}{D_h} \quad [s1]$$

dove  $f$ , detto fattore di Moody, decresce con il numero di Reynolds. Per alti valori del numero di Reynolds, Shames [4] propone la "legge universale di Prandtl per l'attrito" [t1]:

$$\frac{1}{f} = 2.0 \log_{10} (Re \sqrt{f}) - 0.4 \quad [t1]$$

dove:

$$Re = \frac{\rho V_{ca} D_h}{\mu} \quad [u1]$$

e  $V_{ca}$  è la velocità media nella sezione.



Dovendo valutare i valori di  $K_{it}$  per tutte le sezioni del tunnel, è possibile riscrivere il rapporto  $q_l/q_t$  come:

$$\frac{q_l}{q_t} = \frac{A_t^2}{A_l^2} \quad [v1]$$

ed assumendo che il fluido sia incomprimibile, la condizione di conservazione della massa comporta che:

$$\frac{q_l}{q_t} = \frac{A_t^2}{A_l^2} \quad [z1]$$

Se consideriamo invece fluidi comprimibili, la relazione precedente diventa [a2]:

$$\frac{q_l}{q_t} = \frac{A_t}{A_l} \frac{M_l}{M_t} \frac{\sqrt{1 + [\gamma - 1/2]M_t^2}}{\sqrt{1 + [\gamma - 1/2]M_l^2}} \quad [a2]$$

dove  $M$  è il numero di Mach,  $l$  e  $t$  sono gli indici riferiti rispettivamente alla sezione locale e quella di prova. Nel caso dell'aria utilizzata come fluido elaborato dalla galleria, si ha la relazione [b2]:

$$\frac{A_l}{A_t} = \frac{M_t}{M_l} \left( \frac{1 + 0,2 \cdot M_l^2}{1 + 0,2 \cdot M_t^2} \right)^3 \quad [b2]$$

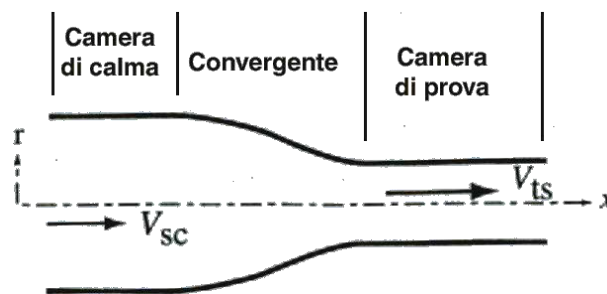
Nella sezione di prova si assume in genere che il numero di Reynolds sia un dato assegnato. Il legame tra il numero di Reynolds nella camera di prova  $Re_t$  ed il numero di Reynolds locale  $Re_l$  è dato dalla [c2]:

$$Re_l = Re_t \frac{l}{D_t} \frac{\rho_l V_l}{\rho_t V_t} \frac{\mu_t}{\mu_l} = Re_t \frac{l}{D_t} \frac{A_t}{A_l} \left\{ \frac{1 + [\gamma - 1/2]M_l^2}{1 + [\gamma - 1/2]M_t^2} \right\}^{0,76} \quad [c2]$$

La valutazione dei flussi immessi sulla zona di prova risultano estremamente critici da valutare perché da questi dipende direttamente la modellizzazione e l'analisi del fenomeno di combustione sviluppato all'interno del banco. Mentre l'aria avanza lungo la camera, lo strato limite aumenta il suo spessore. Questo riduce le dimensioni del flusso e causa un aumento della velocità al di fuori dello strato limite delle pareti. Se l'area della sezione è costante, questo genera una

caduta nella pressione statica locale. Questo effetto è noto come "buoyancy orizzontale", ed è analogo all'effetto dovuto al gradiente di pressione verticale nell'atmosfera. Sarebbe quindi opportuno aumentare in maniera adeguata la dimensione del flusso, al fine di evitare tale fenomeno. In questo caso le pareti dovrebbero divergere in prima approssimazione di circa  $0,5^\circ$  prima di far raggiungere al flusso d'aria la zona interessata alla sperimentazione della torcia. Ovviamente tale considerazione ha validità solo per modelli di galleria ad estensione orizzontale.

Per aumentare la velocità del flusso incidente sulla zona di combustione, si ricorre – come tipicamente avviene nelle applicazioni fluidodinamiche, ad un canale convergente; tale restringimento di sezione può aumentare, se opportunamente dimensionato, la velocità del flusso in entrata alla camera di prova fino ad un fattore di 20 o più; tuttavia incrementi tipici sono nell'ordine di  $6\div 10$  volte. Uno schema tipico è indicato in Figura 15:



**Figura 15: Sezione convergente per immissione aria nella zona di prova della torcia**

Un'analisi monodimensionale del flusso permette di spiegare analiticamente, attraverso le equazioni di Bernoulli e di conservazione della massa, la caduta continua di pressione lungo il tratto convergente della galleria. Definendo il coefficiente di pressione come [d2]:

$$C_p = \frac{(p - p_{ts})}{\frac{\rho V_{ts}^2}{2}} \quad [d2]$$

Monodimensionalmente è possibile scrivere la relazione:

$$C_{p.} = 1 - \left[ \frac{A_{ts}}{A(x)} \right]^2 \quad [e2]$$

dove  $A_{ts}$  è l'area della sezione di prova e  $A(x)$  è l'area in funzione della coordinata lungo la direzione del flusso.

Il coefficiente di pressione è prossimo ad 1 all'imbocco del convergente, e scende fino ad annullarsi in camera di prova. Seguendo questa teoria sembrerebbe che non esistano problemi di instabilità dello strato limite, poiché il gradiente di pressione appare favorevole attraverso il convergente. Sperimentalmente però è possibile osservare che lungo le pareti del convergente, sia all'ingresso che all'uscita, è più lento (e la pressione è più alta) di quanto direbbe la teoria monodimensionale [4]. Se il gradiente avverso di pressione all'ingresso o all'uscita diventa abbastanza alto da portare alla separazione dello strato limite, avremo un degrado della qualità del flusso in camera di prova, nonché un aumento della potenza richiesta e del rumore acustico. Inoltre, non essendo il convergente quasi mai assialsimmetrico, sorgono ulteriori problemi. Per sezioni rettangolari le linee di flusso sulla superficie intersecano le pareti laterali. Questo porta ad un flusso secondario negli angoli, con riduzione di velocità e possibilità di separazione. Questo fenomeno viene evitato adottando una sezione di tipo ottagonale o circolare, così da non presentare mai al flusso angoli maggiori di  $90^\circ$ .

Come fatto sulla sezione costante, anche in questo caso è possibile definire un coefficiente di perdita nella sezione convergente. Tali perdite si considerano dovute al solo attrito; la caduta di pressione si può quindi ottenere dall'integrale:

$$\Delta P_f = \int_0^{L_n} f \frac{\rho V_n^2}{2 D_n} dx \quad [f2]$$

dove:

$L_n$  è la lunghezza del convergente,  $D_n = D_n(x)$  è il diametro idraulico del convergente e  $V_n$  è la velocità media nella sezione locale. Ricordando che gli indici  $ts$  e  $sc$  sono riferiti rispettivamente alla camera di prova e alla camera di calma, l'equazione di continuità [g2] ci dice che:

$$V_n^2 = V_{sc}^2 \left( \frac{D_{sc}}{D_n} \right)^4 \quad [g2]$$

Il coefficiente di perdita nel convergente è quindi dato da:

$$K_n = \frac{\Delta p_f}{q_{sc}} \quad [h2]$$

e quindi, sostituendo a  $\Delta p_f$  l'integrale:

$$K_n = f_{av} \left( \frac{L_n}{D_{sc}} \right)^1 \int_0^1 \frac{D_{sc}^5}{D_n^5} d \left( \frac{x}{L_n} \right) \quad [i2]$$

dove  $f_{av}$  è il coefficiente di attrito medio. Poiché:

$$K_{nt} = K_n \left( \frac{q_{sc}}{q_{ts}} \right) \quad [l2]$$

abbiamo infine:

$$K_{nt} = f_{av} \left( \frac{L_n}{D_{ts}} \right)^1 \int_0^1 \frac{D_{sc}^5}{D_n^5} d \left( \frac{x}{L_n} \right) \quad [m2]$$

Una approssimazione attendibile per  $K_{nt}$  è quella proposta da Wattendorf [4] nella forma [n2]:

$$K_{nt} = 0,32 \cdot f_{av} \frac{L_n}{D_{ts}} \quad [n2]$$

Poiché le perdite in un convergente ammontano a circa il 3% delle perdite totali nel circuito, errori nella valutazione del  $K_{nt}$  sono ad ogni modo meno significativi di quelli commessi nelle sezioni ad alta velocità del circuito.

La valutazione delle perdite sulle varie sezioni ha permesso di fare un dimensionamento preliminare delle geometrie realizzative della camera, facilitandone sia la stima dei flussi in termini di velocità ammissibili sulle varie zone del banco che di scelta progettuale in termini di potenza richiesta dal sistema di aspirazione del banco.

*1.14 SCELTA DELLA TIPOLOGIA DI BANCO PROVA PER L'ANALISI DI TORCE INDUSTRIALI.*

Una volta individuate le peculiarità che un banco prova per lo studio di torce industriali deve avere, avvallandosi di quanto studiato e precedentemente esposto in merito alle stesse sia dal punto di vista prettamente impiantistico per le strutture, che fisico-chimico per quanto riguarda il tipo di fiamma prodotta dal sistema, è stato possibile definire il tipo di banco da allestire. L'analisi effettuata sulla galleria del vento sviluppata dall'Università dell'Alberta ha permesso di avere degli spunti sulla sensoristica da posizionare internamente al banco, tuttavia ha permesso al contempo anche riflettere in merito al tipo di scalatura da imporre ai modelli delle torce. Infatti, per poter mantenere un dettaglio apprezzabile nella geometria delle teste, le sezioni di immissione del tail gas in aria - anche per non incombere in problematiche di realizzazione meccanica - non possono essere particolarmente ridotte. Questo comporta necessariamente, come meglio discusso in seguito, che la dimensione del fronte di fiamma, sia in larghezza che in lunghezza, mostri un'estensione notevole. Automaticamente tutte le sezioni interne della camera dovranno essere dimensionate di conseguenza a tale parametri. La galleria dell'Alberta possiede una grandissima disponibilità di sensori, applicati talvolta anche in prossimità della zona di combustione, permettendo una rilevazione del fenomeno molto accurata. Tuttavia tale galleria nasce esplicitamente per misure su fiamme e su combustibili piuttosto che su teste (tip) di bruciatori industriali. Infatti, di fronte ad un'altissima accuratezza in merito alla rilevazione degli agenti inquinanti prodotti dal combustibile incendiato, le stesse dimensioni ridotte delle fiamme generate e la scarsità di dettaglio realizzativo dei tip non permettono di fare test su sistemi reali e quindi di studiarne specificatamente prototipi avanzati dedicati direttamente alle realtà industriali. Al contrario i pochi produttori al mondo di tali tecnologie, anche se coperte da segreto industriale, hanno dei test rig liberi, sprovvisti di sensoristica sulla fiamma, ma ce permettono di testare tip in dimensioni 1:1 o eventualmente scalate, ma senza perdite di dettaglio nelle geometrie costitutive del sistema.

Per definire quindi il tipo di camera da realizzare, sono state studiate nel dettaglio e quindi vagliate differenti configurazioni a secondo delle principali

classificazioni di banco prova, che sono poi riassumibili sinteticamente in camere ad estensione orizzontale e camere ad estensione verticale.

La soluzione della galleria del vento circolare è stata esclusa da tali valutazioni in quanto, dovendo realizzare un sistema che sarebbe andato a far parte dei sistemi progettuali di un'impresa di carpenteria metallica che sviluppa appunto bruciatori, si è preferito dedicare al banco il massimo delle funzionalità per la realizzazione di sistemi effettivamente spendibili industrialmente, piuttosto che un generare un banco prettamente dedicato a fini di ricerca scientifica come quello sviluppato internamente dall'Università dell'Alberta.

I paragrafi successivi illustrano le peculiarità che sono state valutate e messe in luce dal progetto nel vaglio delle due possibilità progettuali sopra citate.

#### *1.14.1 GALLERIA DEL VENTO AD ESTENSIONE ORIZZONTALE PER TORCE A BASSA VELOCITÀ DI EFFLUSSO*

Questa configurazione prende spunto dal layout classico delle gallerie del vanto per il test dei profili aerodinamici. Il suo sviluppo orizzontale favorisce l'analisi dell'incidenza di flussi controllati trasversali alla fiamma, così da verificarne la resistenza e l'ancoraggio. La struttura prevede fundamentalmente un corpo centrale, una sezione convergente, un motore a voluta, una saracinesca motorizzata per variare la portata in ingresso e i sistemi ausiliari per portare il gas e il vapore. Tuttavia, dovendo innescare al suo interno una zona di combustione, sarà necessario provvedere ad accorgimenti specifici per evitare problemi di danneggiamento del banco, senza tuttavia limitare la fisica del fenomeno che si intende studiare.

La struttura ipotizzata della galleria, prevede una gabbia centrale con le pareti e il soffitto - almeno quelle circostanti alla zona di test della torcia - rivestite in materiale refrattario ceramico, in modo da evitare rischi di incendio locali. Questo problema è particolarmente rilevante soprattutto sulle pareti del soffitto le quali vengono costantemente sollecitate dal pennacchio durante le fasi di funzionamento del test rig. La zona sovrastante il pennacchio dovrebbe prevedere la possibilità di aprirsi in modo da far sfogare la fiamma nei transitori

di accensione e di spegnimento, evitando così l'accumulo dei prodotti della combustione sulle pareti; questo sistema permette contemporaneamente un ulteriore accesso al banco.

E' stato valutato inoltre che la struttura dovrebbe essere rialzata da terra con un telaio di supporto (metallico o supporti di tipo refrattario). Questo permette un accesso diretto di tutti i sistemi ausiliari e delle strumentazioni per le misure direttamente dalla zona inferiore della galleria. Il basamento della galleria dovrebbe essere costituito da una colata di calce livellata e con interposto un pavimento a griglia removibile adeguato al passaggio dei cavi.

Considerando le peculiarità del banco, particolare rilevanza va posta sul collocamento degli strumenti di misura. La parte frontale del test rig dovrebbe presentare un accesso ottico con delle finestre trasparenti di pirex o vetro termico così da permettere la possibilità di acquisire immagini del fenomeno tramite strumentazioni dedicate quali videocamere o termo-camere. Ulteriori accessi per gli strumenti di misura possono essere collocati sulle estremità del banco.

All'interno stesso del banco potrebbe essere inserito un binario sul quale far scorrere (manualmente o tramite controllo elettronico) un braccio meccanico. Questo permetterebbe il riposizionamento dei sensori di misura permettendo di fare misure, ad esempio di emissioni e di rumore, a distanza variabile rispetto al punto d'interesse. Una soluzione più economica ma comunque altrettanto funzionale, può essere quella di allocare i sensori per la misura delle concentrazioni delle specie chimiche direttamente allo scarico della galleria, subito a valle della sezione convergente.

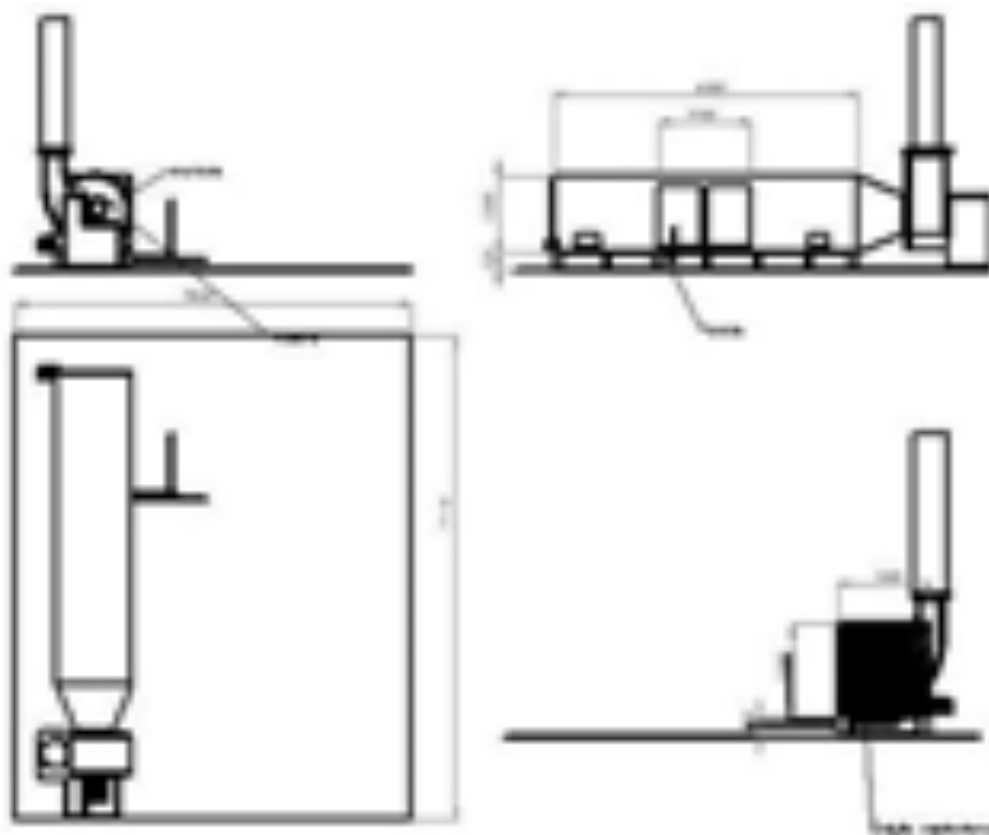
Trattandosi di una camera ad estensione orizzontale, nato appunto per osservare il comportamento della fiamma rispetto all'incidenza di flussi d'aria trasversali, il banco dovrebbe prevedere un sistema di regolazione ottenibile con una saracinesca motorizzata, così da permetterne una facile ma accurata regolazione della portata in ingresso.

Tra la zona centrale e il motore aspirante va posizionata una sezione convergente del condotto, così da aumentare la velocità del flusso nella zona di aspirazione del motore. In tale zona sono con buona probabilità necessari dei filtri per

ridurre l'accumulo di prodotti solidi sulla girante. Analogamente, griglie a maglia fine sulla sezione d'ingresso, limiterebbero l'ingestione di sporcizia proveniente dall'ambiente esterno.

La taglia del motore del sistema di aspirazione va dimensionata opportunamente in funzione dei parametri adimensionali necessari per una scalatura efficace del fenomeno, determinabili definendo le dimensioni effettive del condotto, i volumi in gioco, le portate massime accettabili per lo studio del fenomeno e le perdite di carico stimabili come precedentemente descritto. Oltre al motore e alla girante, conseguentemente dovrà essere scelto il corrispettivo inverter, opportunamente dimensionato sulle richieste imposte da questi. La galleria dovrebbe essere ulteriormente provvista di appositi filtri sia in ingresso che a monte del condotto convergente, in modo da ridurre gli accumuli dei prodotti della combustione sulla girante.

Lo schema complessivo della galleria è riportato nella Figura 16.



**Figura 16: Schema complessivo della galleria (vedi TAV.1)**



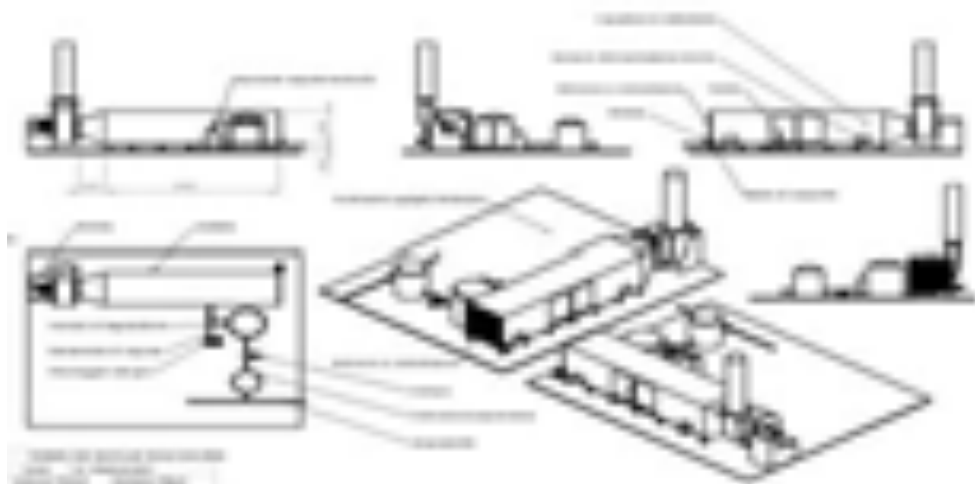
I sistemi di misura devono essere in grado di acquisire le temperature raggiunte dalla fiamma nelle varie zone del pennacchio, le concentrazioni delle specie chimiche, le portate d'aria incidente, di gas bruciato, di vapore e di gas ausiliario. Di particolare importanza è, strutturata la galleria con questa configurazione, la possibilità di ottenere delle stime accurate delle varie concentrazioni delle specie chimiche presenti nel volume di aria elaborato dalle gallerie, a valle della zona di fiamma.

La galleria del vento deve inoltre prevedere almeno due ingressi impiantistici secondari: uno per realizzare gli effetti prodotti dal vapore immesso sulla bocca della torcia per evitare effetti di combustione sporca, e l'altro invece per l'adduzione del gas necessario al mantenimento della fiamma pilota.

Il banco oltre la camera di combustione, prevede numerose criticità realizzative, direttamente intuibili dall'impiantistica strutturale che costituisce una torcia industriale reale. Sarà quindi necessario allestire un sistema di stoccaggio del gas da testare sul modello della torcia. Tali stoccaggi dovranno essere opportunamente dimensionati per contenere una quantità di gas adeguato alle necessità imposte dalla simulazione, in maniera da avere un fronte di fiamma prolungato per un periodo di tempo sufficiente ad effettuare tutte le misure necessarie allo studio del fenomeno. Sulla parte posteriore della galleria, a distanza di sicurezza e seguendo le norme preposte per lo stoccaggio di contenitori in pressione contenente combustibili infiammabili, deve essere alloggiato una struttura attrezzata per il loro dislocamento.

La portata del metano per la il mantenimento della fiamma pilota e quella di Flare gas da immettere nella vena principale devono essere regolate tramite delle valvole a spillo o a saracinesca (a controllo manuale); in ogni caso anche la struttura dove sono collocati i comandi di regolazione delle portate deve essere posizionata in ambiente aperto in modo da limitare i rischi in caso di fughe di gas o deflagrazioni.

La disposizione delle strutture ausiliarie rispetto alla camera previste per questo tipo di sviluppo del banco sono mostrate in Figura 17.



**Figura 17: Schema complessivo della galleria e ausiliari (vedi TAV.2)**

Per quanto ricavato da letteratura, è indispensabile per evitare problemi di combustione sporca e generazione di smoke, aumentare il momento complessivo del gas così da permettere condizioni favorevoli di stechiometria sulla sezione di immissione del flare gas in aria. Per ottenere tale effetto, è stata valutata la presenza di 5 elementi impiantistici:

- Un polmone di espansione e accumulo
- Una pompa
- Un generatore di vapore saturo
- Una valvola di laminazione
- Una valvola di ammissione vapore e valvola di ammissione H<sub>2</sub>O.

Lo schema di massima del sistema prevede che l'acqua venga prelevata portata tramite una valvola opportunamente regolata (manualmente o con sistema attacca - stacca) ad un polmone di contenimento. Da qui una pompa azionata al momento della richiesta, porterà l'acqua all'interno di un evaporatore a piatti, permettendo così la produzione di vapore saturo tramite una resistenza che fornisce la potenza termica richiesta. Sulla mandata del vapore viene posizionata una valvola di laminazione per uscire dalle condizioni di vapore saturo ottenendo, se necessario, vapore surriscaldato da iniettare direttamente sulla sommità della vena principale della torcia. Per simulare gli effetti che si ottengono con immissione di acqua, si può sfruttare una derivazione a valle della pompa che bypassi il generatore di vapore e che arrivi sulla sommità della torcia con un apposito ugello nebulizzatore.

Il sistema, così concepito, è quindi ottimizzato in maniera tale da richiedere una manutenzione e un'adeguata pulizia in tempi compatibili all'impiego effettivo della galleria.

*1.15 GALLERIA DEL VENTO AD ESTENSIONE VERTICALE PER TORCE AD ALTA VELOCITÀ DI EFFLUSSO*

A differenza della precedente, questo tipo di camera permette un approccio completamente opposto rispetto a quanto illustrato nel banco esposto nel paragrafo precedente; tale geometria infatti predilige lo sviluppo in altezza (e in larghezza) di fiamme di dimensione notevole, riducendo di fatto la scalatura dei dispositivi di fiamma ed evitando conseguentemente la perdita di dettaglio dei tip in fase di realizzazione del sistema. Tuttavia, confinando il fenomeno all'interno di una camera di prova, la valutazione dell'incidenza di flussi trasversi non è direttamente apprezzabile e pertanto il tip della torcia in essa testato deve essere duplicato e studiato separatamente rispetto a tale problematica (esternamente come avviene ad oggi nei pochissimi siti di prova utilizzati dai costruttori leader di tali dispositivi).

La struttura deve prevedere fondamentalmente un corpo centrale ad alzata verticale sovrastata da una sezione convergente munita di copertura tale da assicurare lo smaltimento dei fumi, un motore a voluta e un cilindro interno coassiale traforato, così da creare un flusso di aria di diluizione per il contenimento delle temperature e adatto a simulare, in maniera limitata, l'insorgenza di microturbolenze.

L'idea della galleria con estensione verticale, è risultata fin dalle prime fasi di analisi del problema, particolarmente interessante proprio per la possibilità di realizzare dei prototipi preindustriali di torcia, senza dover rinunciare necessariamente al dettaglio costruttivo. Proprio per questo motivo ne sono state pensate differenti soluzioni implementative e da ciascuna di esse si è cercato di estrapolare dei criteri realizzativi che permettesse il massimo della sperimentazione, senza venire meno alle esigenze produttive dettate dalle richieste dell'industria.

Inizialmente, la struttura della galleria ha previsto una gabbia cilindrica verticale contenente una camicia traforata con le pareti raffreddate dall'aria di diluizione.

Tale flusso viene immesso tramite un ventilatore posto tangenzialmente al cilindro sulla parte bassa della camera nell'intercapedine tra le pareti esterne e la contro camera traforata, quindi effluisce da questa verso la zona centrale di fiamma. È stato poi pensato di allestire la parte alta della camera con una cappa convergente coibentata con materiale resistente alle alte temperature, in maniera da prevenire incendi localizzati del soffitto della camera; per questo tipo di banco infatti tale zona, in maniera molto superiore rispetto al pareti laterali, viene costantemente sollecitata dal pennacchio durante tutte le fasi di funzionamento del test rig. Inoltre, per far sfogare la fiamma nelle fasi di accensione e di spegnimento, evitando così l'accumulo sulle pareti dei prodotti della combustione, è stato valutato importante la necessità di rendere la parte superiore del banco apribile tramite azionamento meccanico.

Anche in questo caso, il modello iniziale della galleria è stato concepito rialzato da terra tramite un telaio di supporto metallico o di materiale refrattario. In questo modo è possibile ottenere un accesso diretto per tutti i sistemi ausiliari e per le strumentazioni di misura, direttamente dalla zona inferiore del banco. Considerando le dimensioni e soprattutto l'estensione in altezza del banco, a maggior ragione in questo caso più che nel precedente, il basamento della galleria deve essere costituito da una colate di calce livellata, sulla quale devono essere realizzati degli scannafossi taglia fiamma, opportunamente coperti con una griglia removibile. Allo stesso modo, si è previsto è previsto in maniera analoga, un passaggio interrato delle tubazioni di adduzione dei combustibili alla zona di fiamma.

Anche se in maniera ridotta rispetto alla camera con estensione orizzontale a causa dei considerevoli fronti di fiamma sviluppati, le possibilità di inserimento di sensoristica risultano comunque interessanti e lentamente superiori rispetto a quanto i test rig per uso industriale offrono. La camera deve presentare accessi ottici con delle finestre/oblò trasparenti di pirex o vetro termico, così da permettere la possibilità di acquisire immagini del fenomeno tramite strumentazioni dedicate quali videocamere o termo-camere. Ulteriori accessi per gli strumenti di misura possono essere collocati sulle estremità del banco in prossimità delle pareti. Una trattazione maggiormente approfondita in tal proposito sarà meglio argomentata nel capitolo successivo. Dall'analisi

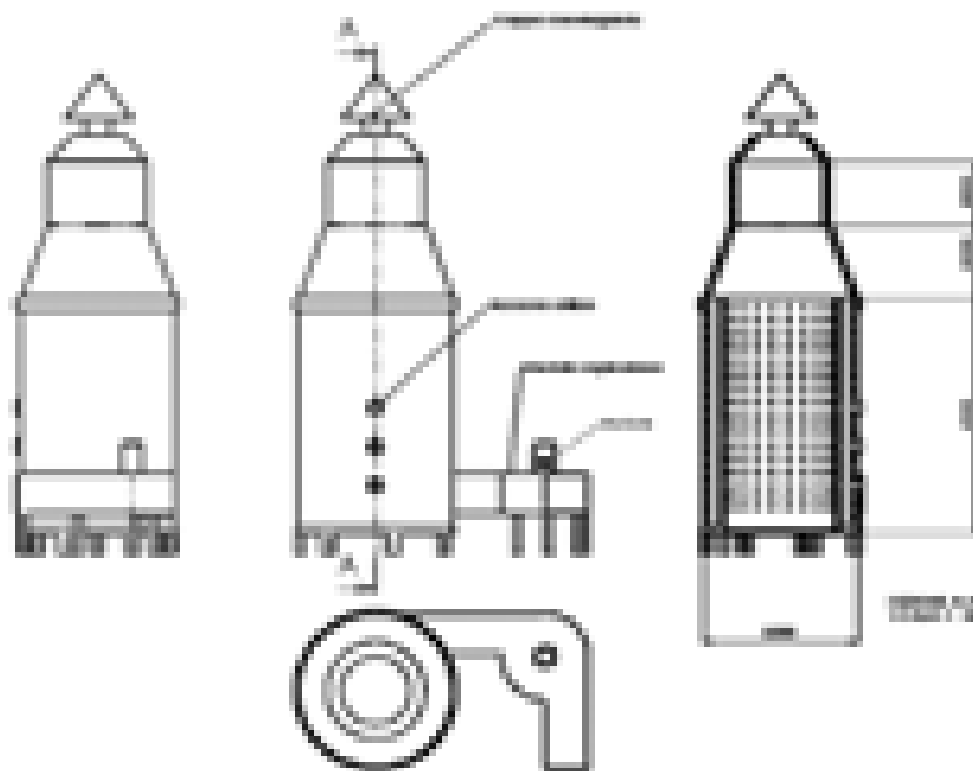
preliminare, e da quanto ho potuto studiare letteratura scientifica, le condizioni ottimali per rilevare le concentrazioni delle specie chimiche presenti nei gas combusti possono essere fondamentalmente due: la prima prevede il posizionamento dei sensori direttamente a valle della sezione convergente imponendo pertanto delle distanze sufficienti ad evitare un eccessivo carico termico sulle strumentazioni stesse; la seconda invece prevede degli spillamenti controllati dei fumi da trattare opportunamente prima di arrivare al sistema di acquisizione degli inquinanti. Come presentato nella soluzione realizzativa, le due opzioni non si escludono a vicenda.

I sistemi di misura principali si concentreranno sulla capacità di acquisire le temperature raggiunte dalla fiamma nelle varie zone del pennacchio, le concentrazioni delle specie chimiche, le portate dei gas tecnici bruciati, del vapore e dei gas ausiliari. Di particolare importanza sarà la possibilità di ottenere delle stime accurate delle varie concentrazioni delle specie chimiche presenti nel volume di aria elaborato dalle gallerie, a valle della zona di fiamma.

La camera con sviluppo verticale può prevedere due diverse modalità di immissione dell'aria: una con tiraggio forzato (con l'ausilio di un aspiratore) e l'altra in condizioni di aria ferma, quindi senza flussi imposti. L'idea iniziale del sistema - tipicamente sviluppata sul concetto di tiraggio forzato - prevedeva che la portata d'aria in ingresso potesse essere regolata tramite una saracinesca di ammissione o tramite sistemi a strozzatura allocati in ingresso al ventilatore. Sfruttando tale configurazione, l'intera camera non presenta contatti con atmosfera esterna se non tramite un canale di adduzione al cui ingresso è posto il ventilatore per l'immissione dell'aria.

Per ridurre il passaggio all'interno della camera degli agenti sporcati, anche in questo caso, come già per la configurazione di banco ad estensione orizzontale, risultano necessari dei filtri a griglia fine sulla sezione d'aspirazione.

Lo schema complessivo della galleria con il motore posizionato a monte della zona di fiamma, è riportato in Figura 18.



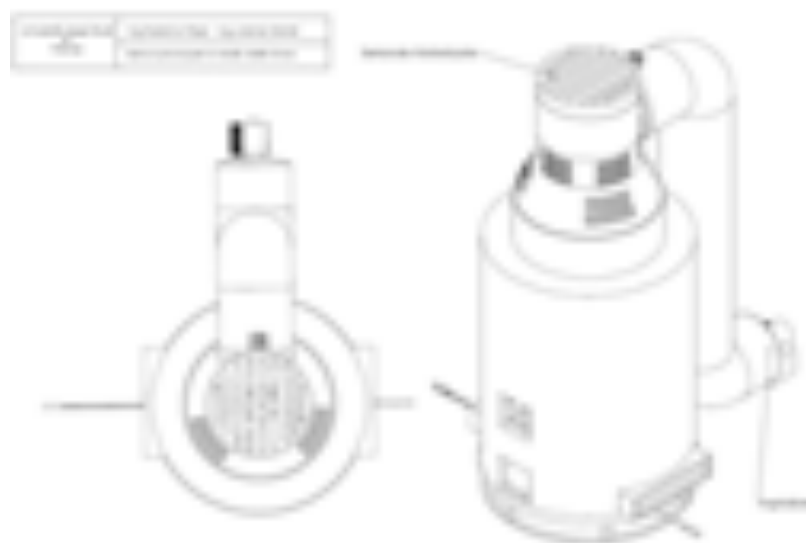
**Figura 18: Schema complessivo della galleria e ausiliari (vedi TAV.3)**

Tuttavia, dopo attente valutazioni, la configurazione considerata più opportuna per la sperimentazione da effettuare sui prototipi di torcia, estendendo il ragionamento da quella sopra presentata, ha previsto di lasciare aperta la base della camera (rialzata da terra) così da permettere l'ingresso dell'aria dalla zona inferiore. Sulla sommità, dopo la sezione convergente, è stato inserito un canale per l'estrazione dei fumi a valle del quale è previsto l'inserimento di un aspiratore. In questo modo il banco presenta la possibilità di funzionare con entrambe le configurazioni sopra indicate, cioè sia con fiamma libera in aria ferma, sia con la presenza di un flusso d'aria ascendente forzato. Inoltre, confinando all'interno del canale di scarico i fumi della combustione, è possibile definire una zona di acquisizione degli inquinanti a sezione costante, così da poter fare una stima effettiva, nota la geometria e la velocità del flusso, delle portate volumetriche in gioco. I dettagli realizzativi di questo sistema saranno illustrati in maniera approfondita nel capitolo seguente

Anche in questo caso, particolare attenzione è stata posta nel criterio di alloggiamento del sistema di stoccaggio del flare gas da bruciare nel banco. La

camera ad estensione verticale, in funzione della sua geometria, permette di effettuare sperimentazioni– a differenza di quella ad estensione orizzontale - sia su torce di processo che su torce di emergenza. Le fiamme prodotte dal modello scalato di torce di emergenza infatti, a causa delle elevate velocità di efflusso dei gas della sezione di uscita del tip, raggiungono lunghezze significative e potenze termiche nell'ordine del Mega Watt. Quindi, per ottenere prove significative in termini di acquisizione delle misure nelle suddette condizioni operative, sono necessarie quantità di combustibile considerevoli. Nei pressi della camera quindi, a distanza cautelativa onde evitare problemi di riscaldamento o di irraggiamento, seguendo le norme di sicurezza su contenitori in pressione contenenti combustibili infiammabili, deve essere allestita una struttura interrata per l'alloggiamento delle bombole di combustibile. Tale struttura deve inoltre essere posizionata in ambiente aperto in modo da limitare i rischi in caso di fughe di gas o deflagrazioni. La portata del metano per il mantenimento della fiamma pilota e quella di flare gas da immettere nella vena principale, dovendo passare dai serbatoi di stoccaggio alla zona di combustione del banco, richiedono di essere regolate opportunamente tramite delle valvole a spillo o a saracinesca a (a controllo manuale o elettronico).

Il modello progettuale di camera ad estensione verticale con estrazione forzata dei gas, è presentato in Figura 19



**Figura 19: Modello di camera ad estensione verticale con estrazione dei fumi forzata.**

### *1.16 SVILUPPO COMPUTAZIONALE DEI MODELLI DI COMBUSTIONE*

Lo studio effettuato sui sistemi di combustione per gas prodotti da lavorazioni industriali o petrolchimiche, parallelamente a quanto individuato e studiato in merito alle peculiarità dei banchi di sperimentazione sulle stesse, ha permesso di avere una panoramica esaustiva sul sistema da implementare durante il presente lavoro di tesi.

Dovendo quindi provvedere a effettuare un primo dimensionamento del banco, è stato fondamentale avvalersi di strumenti di calcolo computazionale per ottenere una corretta valutazione del fenomeno in analisi e delle corrispettive strutture di scala testate al suo interno. Operativamente, sono state fatte considerazioni basate su esperienze pregresse, per valutare le caratteristiche tecniche di vari sistemi di calcolo per flussi reattivi non stazionari disponibili in commercio. Al fine di poter realizzare un'infrastruttura di simulazione che permettesse di studiare i problemi descritti in precedenza sotto un'unica interfaccia e con modalità omogenee, si è optato per sfruttare una piattaforma di calcolo di tipo commerciale su cui implementare specifiche librerie sviluppate nell'ambito del progetto.

Durante questa fase di svolgimento del progetto, si è provveduto alla validazione dei modelli fisici studiati e dei relativi codici di simulazione realizzati; tale attività di validazione è stata condotta utilizzando dati derivanti da esperimenti di laboratorio presenti sulla letteratura scientifica per valutare se il sistema di calcolo messo a punto fosse in grado di simulare in linea generale le tipologie di fiamme da studiare sperimentalmente durante il progetto. I modelli numerici simulati sono stati caratterizzati con i flussi attesi dal primo dimensionamento zero dimensionale del banco di studio, così da valutare se il sistema sviluppato fosse adeguato alle condizioni termo fluido dinamiche che caratterizzano i prototipi di torce desiderati alla fine dell'attività in questione..

Nello specifico, i dati derivanti da esperimenti presenti in bibliografia hanno permesso di validare sia il modello atto a descrivere lo sviluppo della fiamma, sia quello di interazione tra la fiamma pilota e la fiamma principale.



1.16.1 VALIDAZIONE DEL MODELLO PER LA FIAMMA PILOTA

Per validare il modello della fiamma pilota si è considerata la simulazione di un bruciatore di laboratorio (Bunsen), per molti aspetti fortemente assimilabile a quello oggetto del programma in studio, sperimentato presso la Vanderbilt University [5]. Si tratta di una fiamma premiscelata metano aria stabilizzata mediante “Bluff-Body”, come rappresentato nello schema seguente (Figura 20):

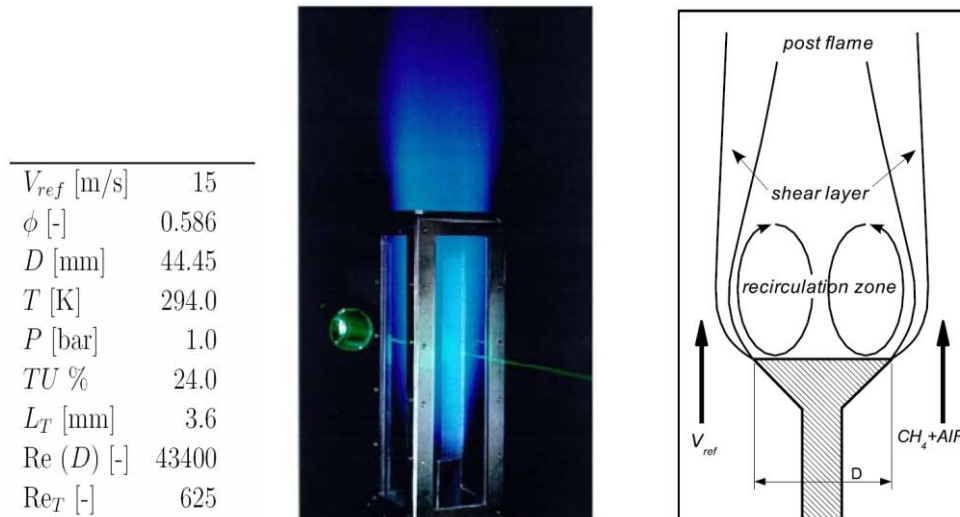


Figura 20: Bruciatore da laboratorio

La disponibilità di misure sperimentali dettagliate, riportate in termini di profili radiali (per varie posizioni assiali) di temperatura e specie chimiche principali, ha permesso un’accurata analisi di affidabilità del modello. La Figura 21 riporta un “contour plot” del campo di temperatura predetto dal calcolo.

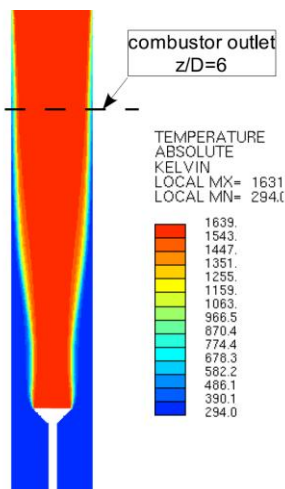


Figura 21: Diagramma termico del bruciatore da laboratorio.

Tale rappresentazione permette quindi di identificare l'andamento delle temperature nelle zone della fiamma, al variare della quota rispetto al punto di innesco del fenomeno e dalle condizioni locali di stechiometria. Calibrando il modello numerico da realizzare per lo studio della torcia scalata da inserire all'interno del banco prova con il modello sperimentato presso la VanderBilt University, è stato possibile individuare le condizioni al contorno e le caratteristiche cinetico/chimiche da imporre per definire il dominio di calcolo del sistema.

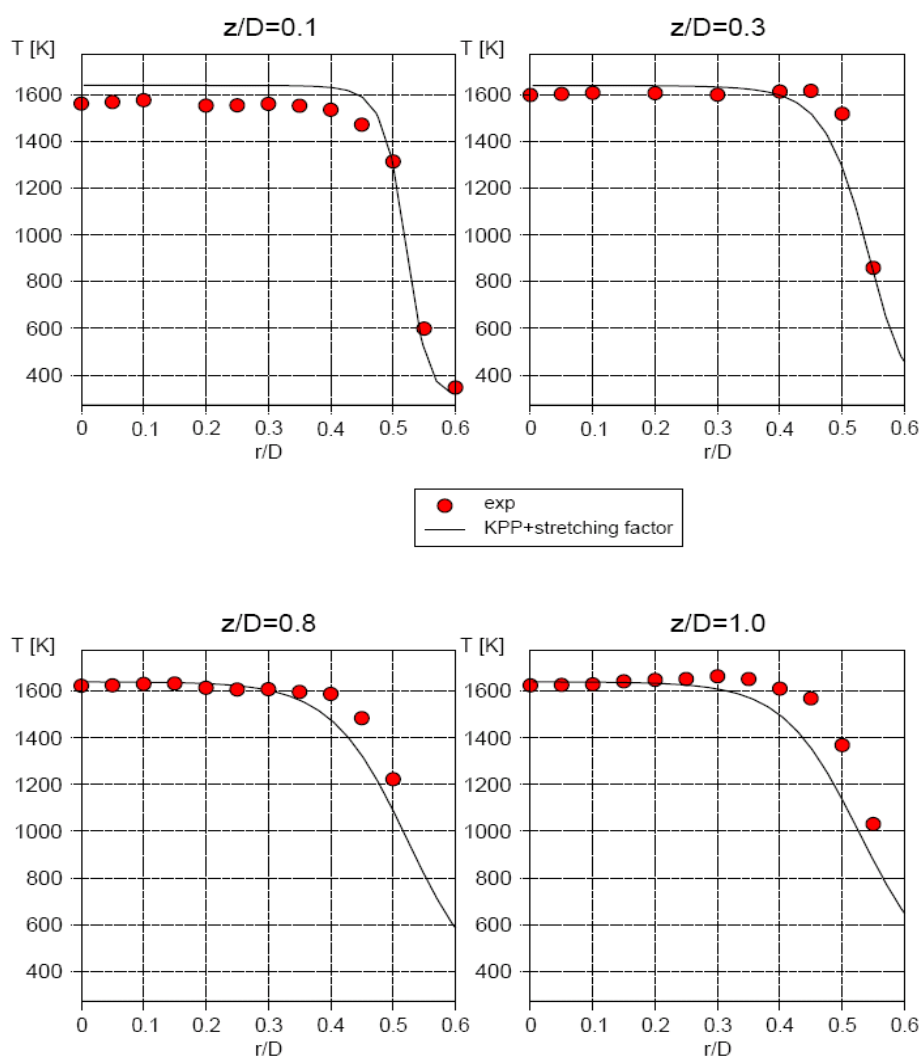


Figura 22: Diagrammi di validazione del modello

La bontà del modello selezionato, come illustrato nei grafici riportati in Figura 22 e Figura 23, è attestato dal confronto diretto con dati sperimentali ottenuti tramite misure dirette basate su tecniche laser; tale studio oltre a mette in evidenza l'accuratezza del modello numerico, ne garantisce anche la

trasportabilità dei risultati rispetto a quanto sviluppato esplicitamente per l'attività di analisi legata allo studio della combustione su torce. In tali grafici, il punto rosso rappresenta il valore sperimentale mentre la curva grigia indica i dati calcolati grazie al modello studiato; in ascissa sono indicati i rapporti adimensionalizzati  $z/D$  dove  $z$  è la quota assiale e  $D$  rappresenta il diametro del bruciatore mentre in ordinata sono riportati i rapporti adimensionalizzati  $r/D$  dove  $r$  è la quota radiale e  $D$  rappresenta il diametro del bruciatore.

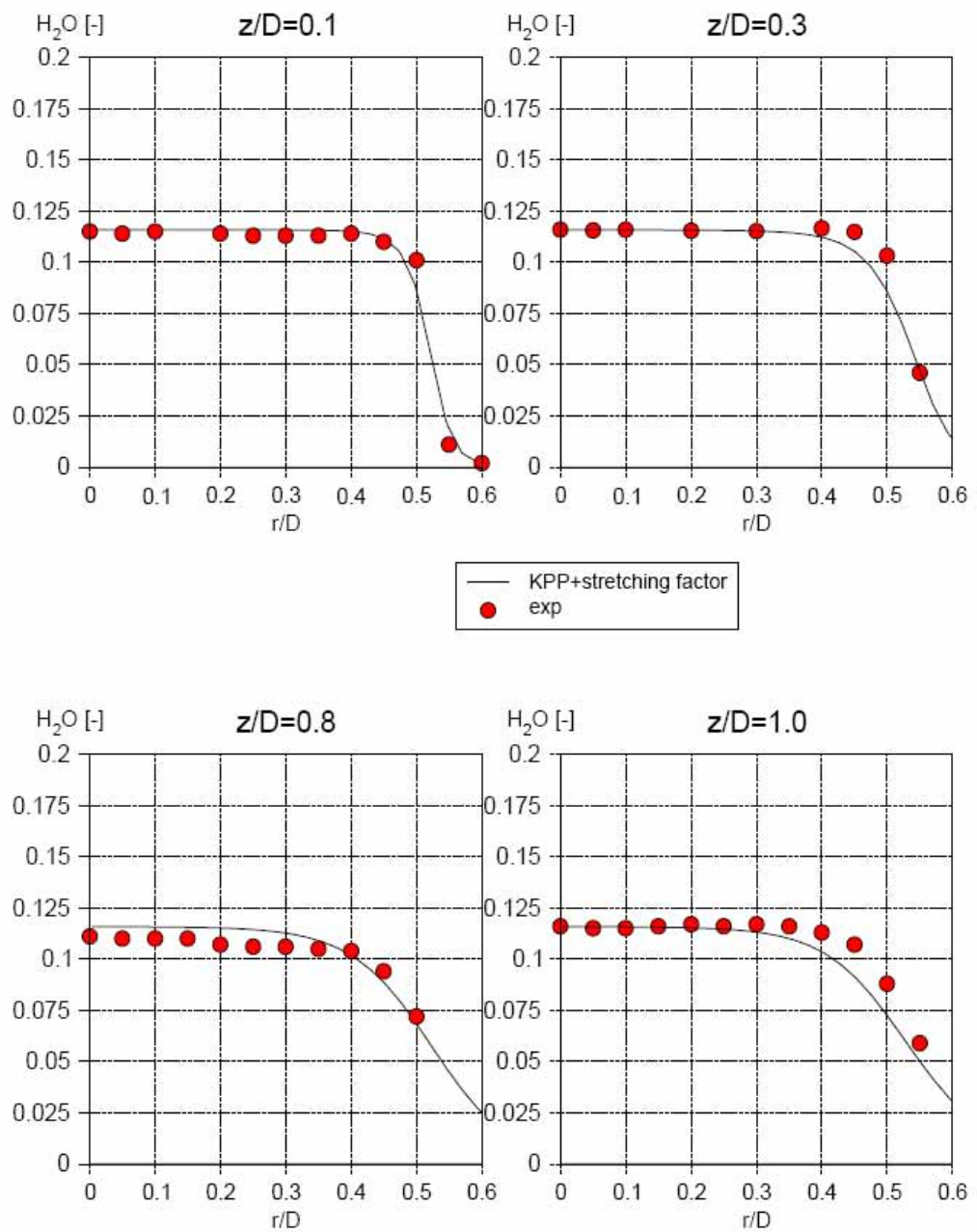
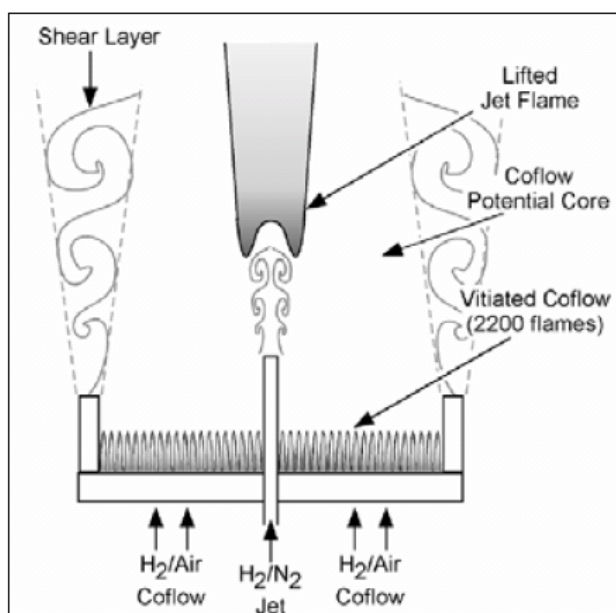


Figura 23: Diagrammi di validazione del modello

1.16.2 VALIDAZIONE DEL MODELLO DELL'INTERAZIONE DELLA FIAMMA PILOTA CON LA FIAMMA PRINCIPALE

Come affrontano nei paragrafi precedenti, il corretto funzionamento di una torcia industriale richiede che il bruciatore principale e la fiamma pilota lavorino contemporaneamente garantendo il massimo dell'efficienza. La presenza e il corretto funzionamento della fiamma pilota infatti risulta indispensabile sia per l'accensione del sistema che per garantire, in termini di sicurezza, la continuità del processo di fronte a possibili spegnimenti. Per tale motivo, analogamente a quanto fatto precedentemente, è stato importante mettere a punto uno schema di calcolo per studiare l'interazione fra i due elementi. Per poter validare il modello dell'interazione della fiamma pilota con la fiamma principale, in questo caso è stato considerato come riferimento un test case pubblicato dalla Berkley University [5]. In Figura 24 è riportato uno schema del dispositivo utilizzato per la validazione e le principali condizioni operative del test di cui sopra.



	Getto centrale	Coflow
D [mm]	4.57	210
V [m/s]	107.0	3.5
T [K]	305.0	1045.0
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	0.86	0.322
Re [-]	23600	18600

Figura 24: Schema concettuale del dispositivo di prova

Tale dispositivo di prova si basa su un flusso principale ed su una serie di flussi secondari, ciascuno dei quali dà luogo ad una fiamma. Il flusso principale, alimentato con idrogeno e azoto, produce una “lifted flame” stabilizzata mediante i prodotti di una fiamma magra premiscelata idrogeno/aria. Il meccanismo di reazione considerato prevede l’impiego di 18 specie chimiche per un totale di 32 reazioni. In Figura 25 si riporta un “contour plot” del campo di temperatura e del radicale OH derivante dal modello di simulazione studiato che permette di evidenziare chiaramente il fenomeno di lift della fiamma principale.

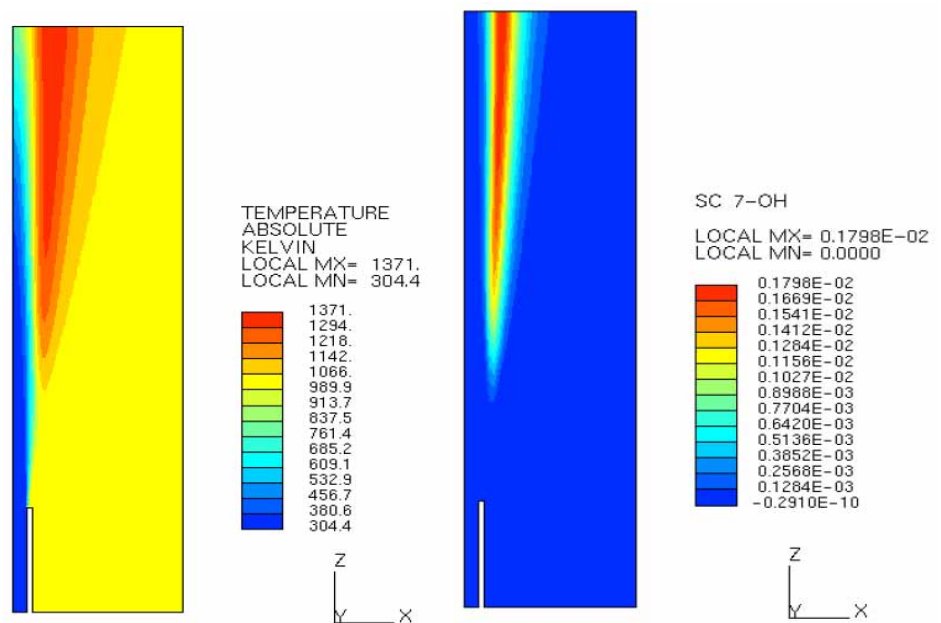
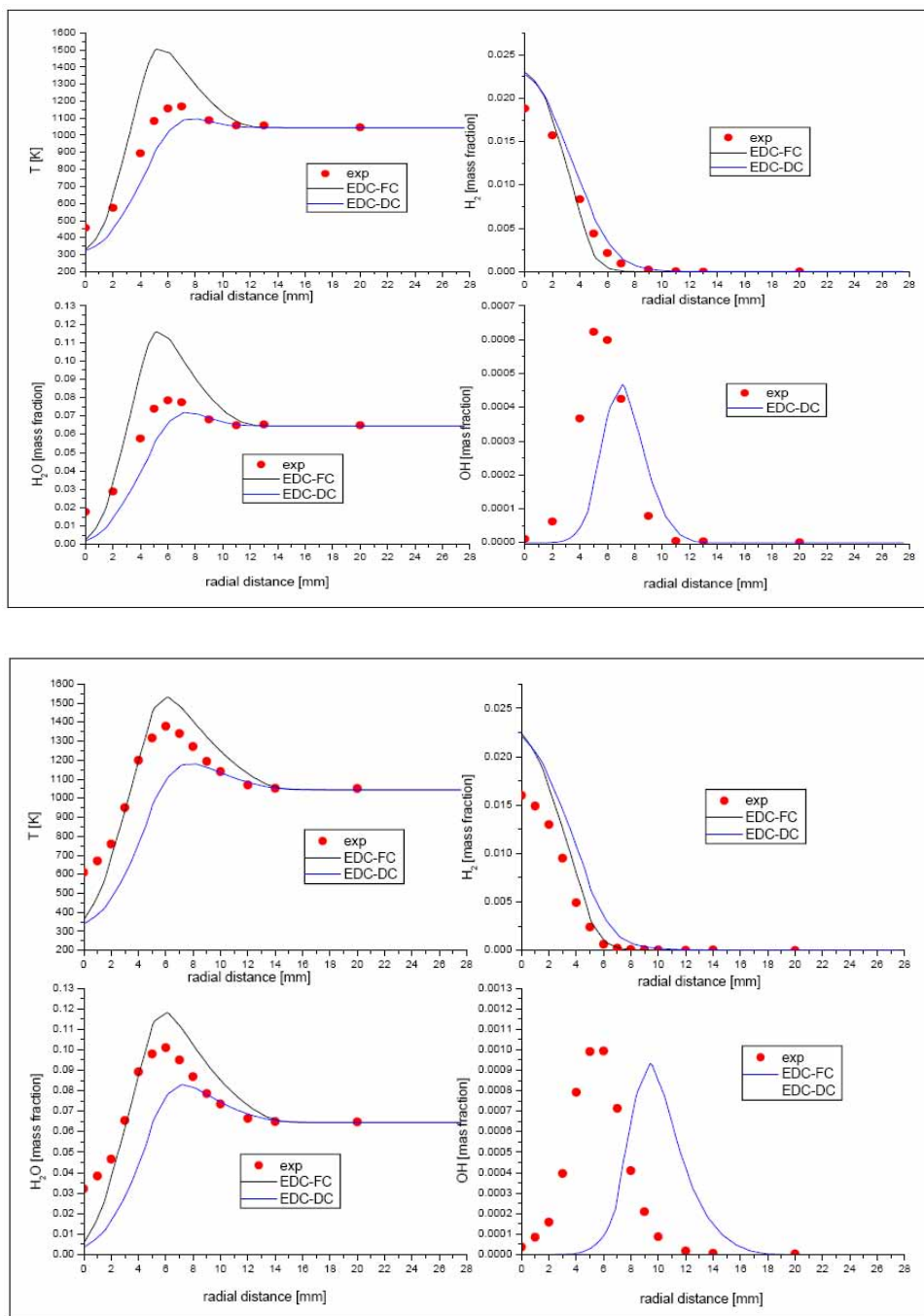


Figura 25: Profilo di temperatura derivante dalla simulazione

Nei grafici riportati in Figura 26 si riporta quindi un confronto diretto tra i valori derivanti dalla simulazione (rappresentati mediante la linea nera EDC-FC) ed i dati sperimentali (evidenziati con i punti rossi), anche in questo caso espressi in termini di profili radiali su differenti quote assiali. Nei grafici sono riportati anche i risultati ottenuti con un modello EDC in cui il meccanismo di reazione è ridotto ad un semplice schema a passo singolo (rappresentati con la linea blu – EDC-DC). In quest’ultimo caso l’accuratezza del modello semplificato è ovviamente inferiore.



**Figura 26: Diagrammi comparativi di validazione del modello**

Anche in questo caso, trasportando quanto acquisito dagli studi pubblicati dalla Berkley University [6] e generando sulla base di questi il sistema di calcolo per la simulazione dell'interazione dei flussi da valutare nel test rig per torce industriali, risulta evidente che, come dall'analisi dei grafici sopra riportati, il modello adoperato può essere considerato attendibile.

*1.17 SOFTWARE COMMERCIALI PER LA PROGETTAZIONE DI TORCE INDUSTRIALI*

Dallo studio effettuato, generalizzando il modello di calcolo delle fiamme dei bruciatori pilota, è stato così possibile simulare nello specifico fiamme parzialmente premiscelate ricche, usualmente impiegate nei dispositivi industriali di torcia. Questa fase del lavoro ha permesso quindi l'acquisizione delle conoscenze innovative necessarie alla definizione di una nuova metodologia di progettazione integrata, basata sui modelli numerici realizzati per effettuare le valutazioni sui sistemi di torcia da testare nel banco prova.

Valutando i principali aspetti progettuali di una torcia per tail gases, verificando lo stato dell'arte nella progettazione di questi dispositivi, è stata svolta parallelamente all'attività sopra descritta, anche una ricerca per capire se in commercio fossero presenti codici di calcolo adeguati a simulare torce industriali (flare) fornendo o verificando i dati macroscopici del funzionamento delle stesse.

In particolare è stato individuato un codice appositamente sviluppato per usi petrolchimici, chiamato *FLARESIM*. Questo software è in grado di svolgere un calcolo a verifica, ossia fornendogli i dati geometrici e fluidodinamici caratteristici della torcia da studiare, ne permette la stima delle prestazioni termodinamiche. Il codice è capace di simulare numerosi tipi di torcia operanti con diversi tipi di combustibili, inoltre comprende le direttive API inerenti alla progettazione delle torce. Tra i vari parametri calcolabili, il software è in grado di valutare il carico termico radiativo ed il rumore emesso dal sistema stesso. L'analisi approfondita di tale software, che essendo stato messo a punto esplicitamente per la simulazione di tecnologie petrolchimiche, ha mostrato che i modelli di calcolo contenuti al suo interno si basano perlopiù su approcci di tipo empirico e su formule derivate dalla sperimentazione di torce esistenti.

*1.18 INDIVIDUAZIONE DELLE CORRELAZIONI DI PRIMO DIMENSIONAMENTO PER APPARATI SPERIMENTALI DEDICATI ALLO STUDIO DI TORCE INDUSTRIALI*

La ricerca bibliografica ha evidenziato, per quanto riguarda lo studio del funzionamento delle torce industriali, la tendenza globale ad effettuare analisi sperimentale piuttosto che numeriche. Tuttavia, nella necessità di effettuare un primo dimensionamento della camera di test per i modelli scalati delle torce, è stato necessario approcciarsi a tali formulazioni, in maniera da avere una prima stima dimensionale del fenomeno (in termini di potenza termica, lunghezza della fiamma, tipologia di combustione, ecc) con grandezze quantificabili. Da tali valutazioni, sono stati stimati gli ingombri del banco prova: in questo modo, utilizzando come punto di design del banco le massime dimensioni del fenomeno in studio, è stato possibile realizzare una camera in grado di testare i sistemi in molteplici condizioni operative di funzionamento.

Tali analisi, come già ampiamente discusso nei paragrafi precedenti, realizzate in gran parte presso la University of Alberta (Canada), sono principalmente indirizzate a valutare gli effetti delle grandezze fluidodinamiche, quali velocità del getto e del cross-flow nonché dei diametri interni ed esterni dello stack, sulla efficienza della flare.

Per efficienza della flare si intende il rapporto tra la portata in massa di carbonio, sotto forma di anidride carbonica, contenuto nei gas di scarico e la portata del carbonio contenuto nel combustibile :

$$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{carbonio}} \text{ come } CO_2}{\dot{m}_{\text{carbonio}} \text{ nel combustibile}} \quad [02]$$

La presenza di incombusti nei gas di scarico che evidenzia l'inefficienza della flare, è attribuita principalmente all'espulsione del combustibile stesso dalla fiamma ad opera del cross-flow e delle strutture di ricircolo da esso create a valle dello stack, fenomeni che vengono complessivamente denominati "fuel stripping". Tipicamente, per la determinazione l'efficienza della flare, è possibile trovare delle correlazioni che sono funzione delle già citate grandezze fluidodinamiche e del potere calorifico del combustibile.



È definita anche l'efficienza di conversione dei solfuri; tale grandezza viene stimata come il rapporto tra la portata in massa di zolfo sotto forma di anidride solforosa contenuta nei gas di scarico e la portata di zolfo sotto forma di acido solfidrico (H<sub>2</sub>S) [p2]:

$$\eta_s = \frac{\dot{m}_{\text{zolfo}} \text{ come } SO_2}{\dot{m}_{\text{zolfo}} \text{ come } H_2S} \quad [p2]$$

Sempre in funzione delle grandezze fluidodinamiche è considerata la scalatura dimensionale della fiamma per la quale è definita una lunghezza caratteristica come la radice quadrata dell'area della sezione trasversale contenuta dall'isoterma a temperatura T tale che:

$$\frac{T - T_\infty}{T_{max} - T_\infty} = 0.5 \quad [q2]$$

dove  $T_\infty$  è la temperatura del cross-flow [q2]. Non esiste pertanto una lunghezza caratteristica per tutta la fiamma ma si fa riferimento piuttosto ad una lunghezza caratteristica che tenga conto dello spreading della fiamma a determinate posizioni assiali (in direzione parallela al cross-flow).

Anche in questo caso, come meglio approfondito nel paragrafo successivo, in letteratura sono fornite correlazioni per la determinazione della lunghezza caratteristica in funzione delle grandezze fluidodinamiche, delle forze di galleggiamento e della posizione.

Sia l'efficienza che la lunghezza della fiamma risultano prevalentemente determinate dall'intensità del cross-flow e dalle forze di galleggiamento, mentre la velocità del getto di combustibile ricopre un ruolo minore.

La velocità del getto è particolarmente significativa per la formazione di particolato solido; nello specifico si riscontra una forte dipendenza dal mixing ratio (prodotto tra le velocità del getto e del cross-flow) in funzione del quale sono definibili delle correlazioni.

Dalla ricerca bibliografica effettuata, è stato possibile individuare un solo lavoro di analisi CFD nella quale sono valutati gli effetti dell'iniezione di aria o di

vapore sul campo termico e sulle emissioni anche di particolato. Le relative simulazioni sono state però condotte in assenza di cross-flow che, come già riferito, svolge un ruolo fondamentale.

Al contempo, nessun dettaglio significativo direttamente ottenibile da letteratura scientifica sulla cinetica chimica e sui regimi di combustione caratteristici delle flare è stato reperito, nonostante un'accurata ricerca. Il motivo di tale difficoltà nell'ottenere studi significativi riguardanti questo tipo di tecnologia, come già più volte ribadito nel presente trattato, è che i pochi leader a livello mondiale che costruiscono questo tipo di sistemi industriali, tengono le loro ricerche coperte da segreto industriale.

Tra le grandezze adimensionali tipiche del fenomeno di combustione in studio, così da ottenere una scalatura efficace - rispetto alle dimensioni reali - delle teste da provare nella camera, particolarmente importanti e indispensabili per il dimensionamento del sistema, sono risultati il numero di Dämholer e il numero di Froude.

Il numero di Damköhler ( $Da$ ), intitolato al chimico tedesco Gerhard Damköhler, è un gruppo adimensionale utilizzato principalmente in fluidodinamica e ingegneria chimica per esprimere il rapporto tra la velocità di reazione e la convezione di materia, detto appunto (primo) numero di Damköhler. Altri gruppi adimensionali portano il suo nome: ad esempio quello che esprime il rapporto tra velocità di reazione e diffusione di materia prende il nome di secondo numero di Damköhler.

Fisicamente il primo numero di Damköhler rappresenta il rapporto fra la velocità massima di reazione del reagente studiato e la velocità convettiva dello stesso in ingresso al reattore. Formalmente viene definito come [r2]:

$$Da_1 = k \cdot \tau \cdot c^{n-1} = \frac{k \cdot L \cdot c^{n-1}}{w} \quad [r2]$$

con  $k$  costante di velocità,  $\tau$  tempo di permanenza,  $n$  ordine di reazione,  $c$  concentrazione,  $L$  lunghezza caratteristica, e  $w$  velocità effettiva.

Un caso tipico per l'utilizzo di tale numero è proprio lo studio di una reazione chimica all'interno di un reattore. Indicando con "A" il reagente limitante (e

quindi il reagente per il quale si segue l'evoluzione chimica), si scrive il numero di Damköhler come [s2]:

$$Da = \frac{r_{A0} \cdot V}{N_{A0}} \quad [s2]$$

ipotizzando lo stato stazionario,  $r_{A0}$  velocità massima di reazione (pari a quella relativa alla concentrazione in ingresso),  $V$  volume del reattore e  $N_{A0}$  numero di moli iniziali nel reattore. Ipotizzando di operare una reazione del primo ordine (con  $k$  costante cinetica), si ha [t2]:

$$r_{A0} = kC_{A0}$$

$$Da = \frac{r_{A0} \cdot V}{N_{A0}} = \frac{k \cdot C_{A0} \cdot V}{Q \cdot C_{A0}} = k \frac{V}{Q} = k \cdot \tau \quad [t2]$$

con  $Q$  portata volumetrica della corrente di reagente e  $C_{A0}$  concentrazione in ingresso del reagente. Il Numero di Damköhler ( $Da$ ) [u2], quindi, fornisce una rapida stima in termini di cinetica del funzionamento del reattore studiato.

$$Da = k \frac{V}{v_{max}} \quad [u2]$$

Il secondo numero di Damköhler [v2] invece fisicamente rappresenta il rapporto fra la velocità massima di reazione del reagente studiato e il flusso diffusivo dello stesso in ingresso al reattore. Si esprime quindi come:

$$Da_{II} = \frac{k \cdot L^n \cdot c^{n-1}}{D} \quad [v2]$$

con  $D$  diffusività del reagente,  $L$  lunghezza caratteristica,  $k$  costante di velocità,  $n$  l'ordine di reazione e  $c$  la concentrazione.

Il numero di Froude ( $Fr$ ), prende il suo nome dall'ingegnere idrodinamico ed architetto navale inglese William Froude, ed è un gruppo adimensionale che mette in relazione la forza d'inerzia e la forza peso..

Il numero di Froude è definito come la radice quadrata del rapporto fra forza d'inerzia e forza peso, ovvero [z2]:

$$Fr = \sqrt{\frac{V_0^3}{g L_0}} = \frac{V_0}{\sqrt{g L_0}} \quad [z2]$$

dove:

$L_0$  è una lunghezza di riferimento [m],  $V_0$  è la velocità di riferimento [m/s] e  $g$  è l'accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>].

Il numero di Froude può essere anche espresso in funzione del numero di Richardson (ne è il reciproco della sua radice quadrata). Per quanto sia risultato utile nella determinazione della lunghezza caratteristica della fiamma, è importante sottolineare che tipicamente tale parametro adimensionale assume un significato rilevante per i fluidi comprimibili (liquidi), mentre non viene usualmente adoperato laddove considerano i gas. Tuttavia dovendo studiare l'immissione di un getto di combustibile gassoso in aria libera, gli effetti di galleggiamento che si vengono a instaurare tra i due fluidi, possono essere affrontati analiticamente sfruttando tale parametro.

Per arrivare alla definizione della lunghezza della fiamma [8], è necessario definire anche il numero di Froude Peters [a3]:

$$Froude_{Peters} = Fr((\rho_{fuel} / \rho_{air})^{0.5}) \frac{\rho_{air}}{((\rho_{air} - \rho_{st}) * \alpha)} \quad [a3]$$

che è funzione della densità del combustibile  $\rho_{fuel}$  e dell'aria  $\rho_{air}$  e pertanto dalle temperature di funzionamento del sistema.

$$Flamelength_{Bal} = \frac{13.5 * (FrPP^{0.4})}{(1 + 0.07 * FrP^2)^{0.5}} * d * ((\rho_{fuel} / \rho_{air})^{0.5}) / Z_{st} \quad [b3]$$

La lunghezza della fiamma è stimata quindi con una correlazione numerica sperimentale proposta da Peters [8] in funzione del numero di Froude Peters, del diametro di efflusso del gas “d” e del coefficiente di mixing fraction  $Z_{st}$ .

Partendo dalle correlazioni ricavate da un'approfondita analisi bibliografica del fenomeno e sopra descritte, è stato quindi possibile individuare le correlazioni sperimentali con le quali implementare sia il foglio di calcolo per l'avanprogetto del sistema, sia i modelli CFD tridimensionali con i quali è stato possibile

raggiungere il primo livello di progettazione della camera di prova e dei prototipi di torcia industriale che saranno descritte nel dettaglio nei paragrafi successivi.

Il banco prova realizzato durante il presente lavoro è stato quindi dimensionato in maniera tale che fosse in grado di contenere il modello in scala dell'intera torcia. Tramite la scalatura dell'intero sistema, si è inteso miniaturizzare tutti i componenti montati sul tip del sistema quali iniettori vapore, fiamma pilota e sistema frangivento. Inoltre, adoperando modelli scalati, limitando quindi la portata del gas combusto, le quantità di combustibile necessarie allo studio del fenomeno e conseguentemente le dimensioni effettive del pennacchio prodotto, rendendo complessivamente l'intero banco di prova più gestibile sotto molti aspetti operativi. A livello di sensoristica infatti, buona parte delle problematiche che sorgono nello studio di questo tipo di tecnologie, nascono proprio dal dover gestire un fenomeno di combustione che per sua natura risulta difficilmente contenibile. Infatti i notevoli carichi termici sviluppati dalla fiamma nelle condizioni operative, assieme alla volontà di osservarne il comportamento di fronte alla presenza di agenti atmosferici, ha comportato la generazione di due banchi paralleli gestibili separatamente: uno confinato all'interno del banco prova e strettamente dedicato alle misure da effettuare sulla fiamma, e l'altro invece rialzato da terra, ottimizzato per osservare l'incidenza degli agenti atmosferici sulla torcia.

Dovendo quindi scalare la testa del sistema e tutti i componenti secondari necessari per le fiamme pilota o per l'ancoraggio della corona, l'utilizzo di strumenti numerici di calcolo ha permesso una prima valutazione delle grandezze caratterizzanti il fenomeno di combustione prodotto all'interno del banco prova.

Partendo dalle dimensioni reali di alcune torce industriali realmente funzionanti, ottenute direttamente da disegni costruttivi resi disponibili dalla collaborazione con la ditta G.A.M Oil&Gas, la prima valutazione è stata fatta sul calcolo della dell'alzata e della sezione di uscita della torre scalata, mantenendone invariati i rapporti, e permettendone così l'inserimento all'interno del banco. La stima della lunghezza prodotta dalla fiamma (strettamente legata alla velocità di uscita dalla

testa e dal suo diametro), ha quindi permesso di stimare l'estensione verticale del banco prova realizzato.

Analogamente, valutando la posizione del modello della torcia all'interno del banco prova, è stato possibile stimarne la distanza ottimale dalla sezione d'imbocco, così da garantire lo sviluppo dello strato limite e la distribuzione della turbolenza prodotta della portata in ingresso alla galleria. Tale operazione ha permesso di allineare il fenomeno di combustione in studio, con quanto confermato da letteratura scientifica e precedentemente presentato.

Per garantire in termini di valutazione globale del fenomeno la presenza efficace degli effetti generati della fiamma pilota e dai sistemi d'immissione di acqua o di vapore (indispensabili per aumentare il momento complessivo del gas ed evitare la generazione di smoke), i dispositivi sono stati opportunamente scalati in funzione dei rapporti di similitudine e dei parametri caratteristici, senza però incombere in perdite di funzionalità rispetto ai loro compiti.

#### *1.18.1 CRITERI DI SCALATURA E VALUTAZIONE ZERO-DIMENSIONALE DEL FENOMENO*

La flare scalata sono state concepite per riprodurre quanto più fedelmente possibile le caratteristiche della flare reale. Particolare cura è stata messa nel ricreare le condizioni che assicurino la stessa cinetica chimica operando sul modello scalato con la stessa velocità di efflusso della flare reale.

Non avendo la garanzia di poter operare sempre con il medesimo combustibile con il quale lavorano la flare reale di cui se ne desidera testare funzionamento, si è valutato di rendere il banco operativo anche utilizzando una miscela di combustibile che presenti lo stesso peso molecolare, secondo il criterio di Wobbe, e possibilmente, con un potere calorifico confrontabile a quello di riferimento.

Oltre alla velocità e al peso molecolare, per uno studio efficace del fenomeno, è fortemente condizionata tenere sotto controllo la temperatura del combustibile affinché questo si mantenga costante durante la prova, garantendone la conservazione della portata in massa.

Per quanto già precedentemente descritto, la velocità di efflusso combustibile della flare è strettamente dipendente dal suo impiego; una flare di emergenza dovrà smaltire rapidamente grandi quantità di gas e pertanto avere velocità di efflusso consigliere. Il parametro velocità, assieme al rapporto stechiometrico aria/combustibile ed alla sezione dello stack, determina quindi, dal punto di vista della realizzazione della camera di test, oltre alla portata consumata durante la prova e alle potenza termica prodotta, la lunghezza della fiamma e quindi l'alzata verticale del banco sperimentale.

In questa fase del progetto, sono stati quindi studiati e realizzati gli strumenti progettuali zerodimensionali specifici per la definizione preliminare delle principali caratteristiche tecniche delle torce. Tali elementi sono stati utilizzati come base di partenza per la progettazione vera e propria dei prototipi di torce che è stata svolta interamente sfruttando i sistemi e le metodologie CFD acquisite nella prima parte del lavoro

Gli strumenti in oggetto sono stati sviluppati basandosi fondamentalmente sulle correlazioni empiriche, tipicamente derivanti dal campo dei combustori di turbine a gas, di cui discusso nel paragrafo 1.18. In particolare è stato sviluppato un sistema di calcolo con interfaccia Excel, sviluppato tramite la programmazione di macro dedicate che interagiscono con librerie esterne. Questo foglio di calcolo, chiamato “*Flare Scaling.xls*” ha permesso di determinare preliminarmente la potenza termica prodotta da una torcia e la rispettiva lunghezza della fiamma, in funzione delle composizione del gas da bruciare, della temperatura dell'aria comburent e degli altri parametri costitutivi del fenomeno simulato.

Avvalendosi di tale, software è stato possibile effettuare in maniera efficace l'attività cosiddetta di “*avanprogetto*”, ovvero di definire preliminarmente le principali caratteristiche tecniche delle torce al fine di valutarne i vincoli realizzativi in termini di altezza del derrick e dimensioni.

Al fine di ottenere una maggiore accuratezza nella valutazione delle condizioni di funzionamento della camera, considerando che la temperatura - e quindi la densità - dell'aria coinvolta nella combustione risulta fondamentale per la valutazione della reazione in analisi, il software è stato concepito per effettuare il

calcolo sia in condizioni di funzionamento estivo che in condizioni di funzionamento invernale. Nelle figure seguenti (Figura 27) si riportano alcune schermate dell'interfaccia del foglio di calcolo "Flare scale.xls".



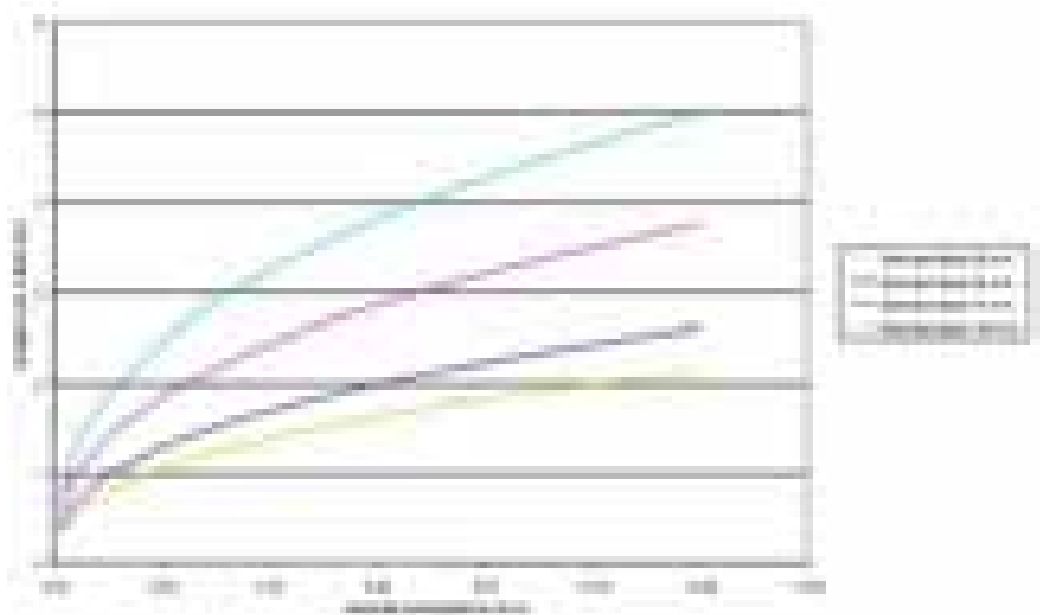
**Figura 27: Interfaccia del foglio di calcolo per la stima delle grandezze fisiche di avanprogetto e delle caratteristiche termodinamiche all'interno della camera**

Il software si presenta con due pagine di calcolo: la prima permette di determinare lunghezza della fiamma, mentre la seconda di valutare le geometrie della camera in termini di diametro, alzata e velocità dell'aria in ingresso al



banco (controllabile tramite il sistema di aspirazione). Come parametri di ingresso, devono essere note le condizioni dell'aria comburente (in termini di temperatura, e di numero di Shmit), le condizioni del combustibile in ingresso nella camera (temperatura, velocità, densità e composizione), i parametri geometrici che definiscono la testa della torcia (nello specifico il diametro del sezione di uscita). Complessivamente, il foglio di calcolo permette di stimare la lunghezza della fiamma, il carico termico prodotto sulla camera, la temperatura massima raggiunta dalla fiamma, la temperatura dei fumi in uscita dal banco e la portata d'aria comburente da aspirare nella camera.

Nel grafico seguente (Figura 28), e riportato l'andamento ottenuto dal calcolo previsionale della lunghezza della fiamma [m], in funzione della relativa velocità d'immissione del combustibile, calcolata al variare del diametro dello stack della torcia.

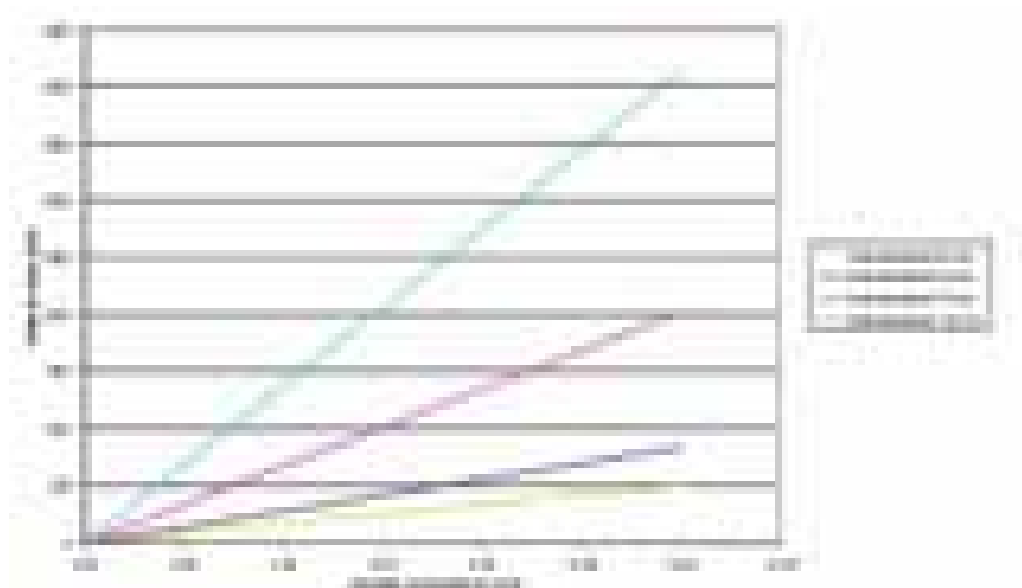


**Figura 28: Calcolo della lunghezza della fiamma**

Come facilmente leggibile dagli andamenti, con un diametro dello stack di 70 mm, operando con velocità del getto comprese fra gli 8 e i 10 m/s, il fronte di fiamma sviluppato si aggira tra i 3 e i 4 m; tanto più la velocità di efflusso è bassa, tanto più la lunghezza della fiamma risulta poco sensibile alla variazione del diametro di efflusso. Al contrario, avendo un andamento divergente delle curve, ad alta velocità, l'incremento della sezione di uscita si traduce

direttamente in un considerevole aumento della lunghezza della fiamma prodotta.

Partendo da questo calcolo, è stato possibile dimensionare l'altezza massima della cappa del banco di test a dimensioni ridotte. Analogamente a quanto fatto sopra, nella figura seguente (Figura 29), è riportato il grafico della potenza termica prodotta dalla combustione, in funzione del diametro dello stack della torcia a dimensioni scalate e della relativa velocità del combustibile.



**Figura 29: Calcolo della velocità del combustibile**

L'andamento divergente delle curve, nettamente più marcato rispetto a quanto visto in precedenza in Figura 28, mostra come l'aumento di velocità generi, di fronte a diametri di uscita progressivamente sempre maggiori, un forte aumento del carico termico prodotto dalla fiamma

Effettuando numerose simulazioni numeriche, variando i parametri geometrici del banco e quelli caratteristici del fenomeno, è stato quindi possibile ottenere un dimensionamento preliminare per la determinazione gli ingombri della camera di prova; così facendo stato possibile disegnare un sistema adeguato alla sperimentazione di modelli scalati di torce industriali, senza rinunciare a dettagli geometrici realizzati importanti per la valutazione della loro efficienza.

Fissati i parametri geometrici fondamentali per la definizione del banco prova e delle teste di riferimento da sperimentare al suo interno, è stata fatta una considerevole analisi di sensibilità su tutte le grandezze di interesse per la

progettazione e la realizzazione del sistema, variando le caratteristiche chimiche compositive del combustibile e le rispettive condizioni termodinamiche di funzionamento.

In Tabella 3 sono riportati alcuni dati di potenza termica, consumi di combustibile e lunghezza della fiamma in funzione della velocità di efflusso valutati su una testa di torcia industriale scala. Il combustibile utilizzato ha un peso molecolare di 22,3 kg/kmol e un potere calorifico di 48204.7 kJ/kg, paragonabili a quelli del gas smaltito dalla flare di riferimento progettata da APS e montata presso il *Crude Oil Treatment Plant di Majnoon Oil Field-IRAQ* che ha la velocità di efflusso pari a circa 56 m/s.

Diametro interno stack	Velocità di efflusso	Portata	Lunghezza fiamma	Potenza termica
[mm]	[m/s]	[g/s]	[m]	[kW]
24.38	56	23.69	2.95	1141.82
48.77	56	94.75	5.25	4567.28
48.77	10	17.03	2.77	821.01
48.77	2	3.406	1.47	164.2
36.58	2	1.916	1.17	92.36
30.48	2	1.33	1.01	64.14

**Tabella 3: Alcuni esempi di torce, combustibile costituito da una miscela 1:1 in massa propano-metano**

Dalla tabella si riscontrano la variabilità di altezze e di potenze delle fiamme in funzione della portata e del diametro dello stack. E' importante inoltre sottolineare come la lunghezza della fiamma, come peraltro riscontrato sperimentalmente e mentre approfondito in seguito, sia fortemente influenzata dalla temperatura dell'aria: ad una temperatura maggiore corrisponde una fiamma più lunga pertanto la temperatura della camera deve essere controllabile tramite una parzializzazione dell'aria secondaria immessa al suo interno.

In questa fase preliminare di progettazione delle grandezze geometriche caratteristiche dei dispositivi di torcia, va sottolineato che la lunghezza della fiamma è stata calcolata per mezzo di una correlazione che non tiene conto degli effetti dei dispositivi di ancoraggio come le fiamme pilota, considerando quindi solamente gli effetti competitivi prodotti dal miscelamento del getto di combustibile immesso direttamente in aria ferma. Come ragionevole aspettarsi, e peraltro confermato dalla fase di sperimentazione che sarà meglio dettagliata in

seguito, la lunghezza della fiamma prodotta è risultata essere in realtà inferiore rispetto a quanto stimato dalla correlazione.

Trattando si di un sistema di calcolo zero dimensionale, la valutazione effettuata sulla combustione in studio non esclude comportamenti notevolmente diversi tra le fiamme ad alta velocità e quelle a bassa velocità, soprattutto se sottoposte a flussi d'aria aspirati come quelli prodotti dall'accensione del sistema di aspirazione previsto per la realizzazione del banco prova. Il sistema di calcolo per l'avanprogetto, è stato usato sia per la definizione preliminare del banco di studio a dimensioni ridotte, che del banco di studio elevato da terra (chiamato in seguito anche a dimensioni reali); tali strutture saranno descritte nel dettaglio nel capitolo successivo.

Seguendo questa linea progettuale, il banco prova permette di analizzare le emissioni e tutti i parametri termodinamiche fondamentali per la valutazione del fenomeno di combustione applicato ai sistemi di torce industriali, mentre la torcia elevata da terra, di testare gli effetti prodotti dagli agenti atmosferici sull'ancoraggio della fiamma sia in condizioni di regime che durante le fasi transitorie di avvio e di spegnimento. Da quanto estrapolato dal poco materiale tecnico reperibile, nel caso di emergency flare le velocità di uscita del gas sono necessariamente molto elevate ( $> 40$  m/s). Pertanto, a causa delle elevate lunghezze di fiamma prodotta ( $>10$  m), non è possibile utilizzare una galleria coperta, anche se ad estensione verticale, perché mantenendo inalterata la velocità di efflusso, per contenere la lunghezza del fronte di fiamma, sarebbe necessario ridurre eccessivamente il diametro dello stack ( $< 10$  mm). Come già in precedenza anticipato tale soluzione non risulta essere appropriata in quanto, a causa dell'eccessiva miniaturizzazione imposta, non permette una corretta valutazione degli effetti prodotti dai sistemi di stabilizzazione della fiamma come i fori della corona di ancoraggio o i piloti.

Queste considerazioni, coadiuvate dallo studio delle strutture già analizzate, ha ulteriormente evidenziano la necessità di affrontare il problema con differenti soluzioni costruttive in funzione del tipo di flare da analizzare. Si è pensato quindi di affrontare l'analisi delle flare a bassa velocità all'interno del banco prova, permettendosi così di generare fronti di fiamma monitorizzabili tramite

strumentazione di misura dedicata, mentre di valutare il comportamento delle flange ad alta velocità su un sistema parallelo rialzato da terra (22m), senza incorrere in problemi di fiamme eccessivamente grandi da poter essere gestite e analizzate a distanza ravvicinata. Questo secondo sistema di sperimentazione non esclude ovviamente la possibilità di testare anche torce a bassa velocità di efflusso (o torce di processo).

I sistemi di calcolo sopra descritti sono stati quindi integrati con gli altri strumenti progettuali quali i codici di calcolo simulativi per il dimensionamento strutturale delle torce, i sistemi di progettazione di tipo zero dimensionale ed i codici di calcolo CFD studiati nelle altre attività del progetto, così da generare un'unica procedura esecutiva strutturata. Tale procedura consente, sulla base di determinati requisiti tecnici esterni come, ad esempio, portata, composizione del gas da bruciare, energia radiante al suolo massima, etc. di definire la configurazione progettuale ottimale ai fini del contenimento delle emissioni di sostanze inquinanti e della massima efficienza funzionale del dispositivo.

#### *1.19 ANALISI CFD PRELIMINARE DEL BANCO PROVA*

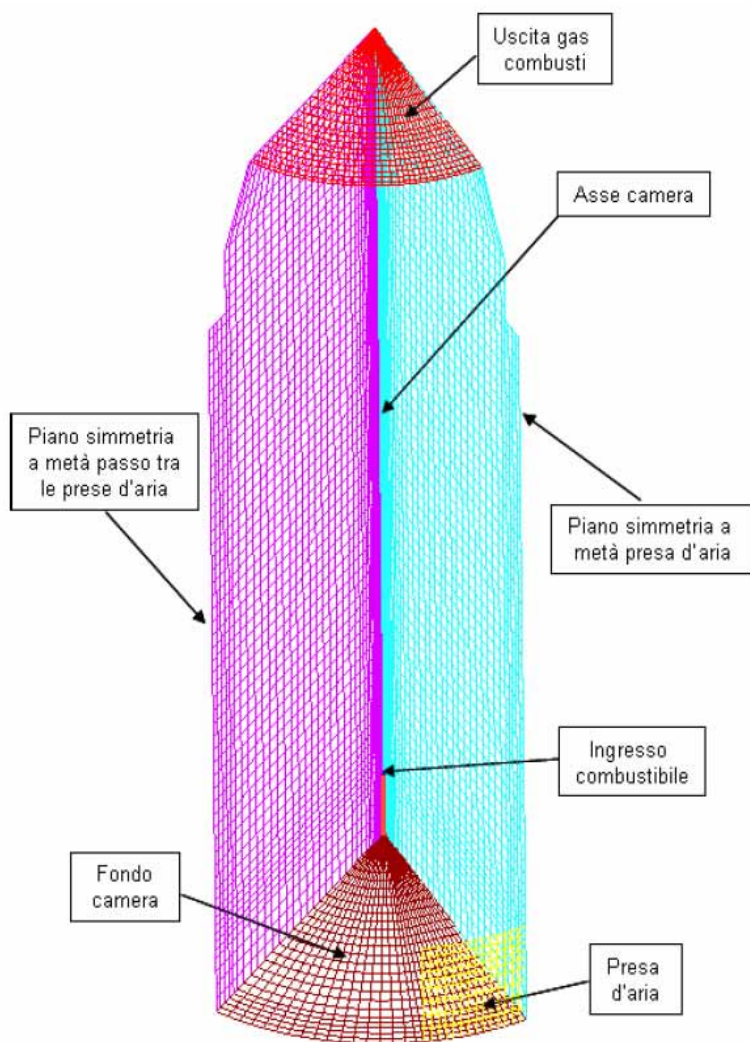
Nelle fasi precedenti del lavoro è stato quindi possibile prima definire le peculiarità desiderate per l'allestimento del banco prova per torce industriali e poi, tramite i sistemi di calcolo zero dimensionale descritti nel paragrafo precedente, ottenere un primo dimensionamento degli ingombri della camera e delle torce scalate. I paragrafi che seguono illustrano i modelli di analisi CFD risultati necessari per raggiungere gli schemi costruttivi ed impiantistici definitivi dedicati alla realizzazione del banco; tali simulazioni sono risultate necessarie per una maggiore comprensione del fenomeno di combustione sviluppato all'interno del banco, fornendo così tutti gli elementi necessari per l'ottimizzazione del fenomeno in studio.

##### *1.19.1 MODELLO DI COMBUSTIONE TURBOLENZA*

Dopo aver studiato e provato l'applicazione di numerosi modelli fisici della combustione, è stato messo a punto per l'applicazione in oggetto un sistema di calcolo basato sull'approccio noto in bibliografia con il nome di "presumed-pdf flamelet approach" per fiamme diffuse. Occorre sottolineare che anche nella

definizione delle griglie di calcolo sono stati provati vari tipi di approccio al problema in funzione della particolare forma del banco di studio per torce in dimensione ridotta. Al termine di tale studio si è preferito sfruttare le simmetrie delle geometrie della cappa di contenimento del banco di studio. Come meglio descritto in seguito, infatti, tale sistema è basato su un corpo sostanzialmente cilindrico a simmetria assiale al cui interno viene posta la torcia a dimensioni scalate da sperimentare.

La geometria della cappa di contenimento è stata quindi schematizzata semplificando il corpo cilindrico, ovvero considerando uno spicchio di  $60^\circ$  con due piani di simmetria paralleli all'asse della camera, come di seguito raffigurato (Figura 30) ed esteso per simmetria a tutto il campo di misura.



**Figura 30: Rappresentazione della geometria del banco di studio a dimensioni ridotte**

Il volume sopra descritto viene rappresentato mediante una griglia (mesh) composta da 74834 elementi. Sfruttando il modello numerico di calcolo CFD della fiamma ricavato da letteratura scientifica e presentato nei paragrafi precedenti, sono state condotte quindi simulazioni numeriche finalizzate sia ad analizzarne la stabilità e l'efficienza, sia a valutarne il comportamento nelle varie condizioni di funzionamento ipotizzabili per i prototipi di torce in scala ridotta.

#### *1.19.2 VALUTAZIONE CFD DEL MODELLO DI FIAMMA SVILUPPATO NEL BANCO PROVA*

Utilizzando quindi i parametri numerici di primo dimensionamento ottenuti con il foglio di calcolo per l'avanprogetto, sono state effettuate simulazioni CFD specifiche per valutare gli effetti della combustione all'interno del banco prova ad asse verticale.

Al fine di avere una maggiore comprensione del fenomeno e garantire che il modello zero dimensionale precedentemente messo a punto garantisca l'accuratezza richiesta per il corretto dimensionamento del banco, partendo dalle simulazioni precedentemente ottenute, sono state effettuate quindi le corrispondenti simulazioni CFD.

In Tabella 4 si riportano le condizioni testate mediante la valutazione preliminare dell'altezza della fiamma per diverse condizioni di esercizio. Il peso molecolare è ottenuto con la miscela di metano e propano rispettivamente del 50.51 % e del 49.49 %.

ID fiamma	T <sub>fuel</sub> [K]	P <sub>m fuel</sub> [kg/kmol]	dens fuel [kg/m <sup>3</sup> ]	dens <sub>ST</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Z <sub>st</sub> [-]	T <sub>st</sub> [K]	LHV [kJ/kg]
<b>d=70mm</b>							
vfuel=5;vair=0.5	300	23.41369	0.90888	0.14914	0.0576	2257.332	48204.7
vfuel=5;vair=1	300	23.41369	0.90888	0.14914	0.0576	2257.332	48204.7
vfuel=10;vair=0.5	300	23.41369	0.90888	0.14914	0.0576	2257.332	48204.7
vfuel=3;vair=0.5	300	23.41369	0.90888	0.14914	0.0576	2257.332	48204.7
<b>d=45mm</b>							
vfuel=3;vair=0.5	300	23.41369	0.90888	0.14914	0.0576	2257.332	48204.7
vfuel=5;vair=0.5	300	23.41369	0.90888	0.14914	0.0576	2257.332	48204.7

**Tabella 4: Riepilogo condizioni testate**

Le condizioni al contorno rispetto alle quali è stata effettuata la valutazione numerica di cui sopra, sono riepilogate invece in Tabella 5.

ID fiamma	Portata fuel [kg/s]	Diametro stack [m]	u_0 [m/s]	Taria [K]	Schmidt [-]
<b>d=70mm</b>					
vfuel=5;vair=0.5	0.017488886	0.07	5.00	300	0.7
vfuel=5;vair=1	0.017488886	0.07	5.00	300	0.7
vfuel=10;vair=0.5	0.034977772	0.07	10.00	300	0.7
vfuel=3;vair=0.5	0.010493332	0.07	3.00	300	0.7
<b>d=45mm</b>					
vfuel=3;vair=0.5	0.00433653	0.045	3.00	300	0.7
vfuel=5;vair=0.5	0.00722755	0.045	5.00	300	0.7

**Tabella 5: Riepilogo condizioni al contorno**

Infine, le rispettive stime di potenza termica e di lunghezza della fiamma sono presentate in Tabella 6.

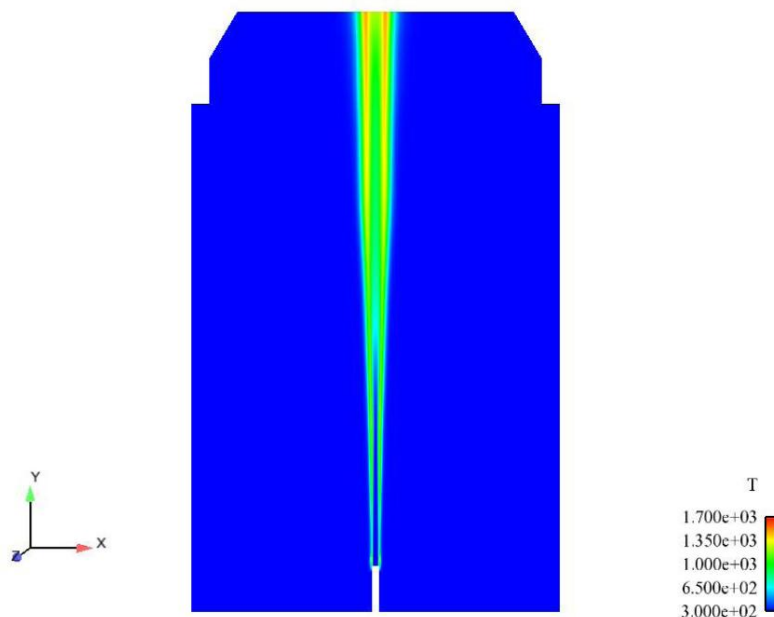
ID fiamma	Froude	Fr_Peters	Flame length	Potenza termica [kW]	L/D correlazione [-]
<b>d=70mm</b>					
vfuel=5;vair=0.5	36.406	36.637	2.665	843	38.073
vfuel=5;vair=1	36.406	36.637	2.665	84	38.073
vfuel=10;vair=0.5	145.624	146.548	3.495	1686	49.941
vfuel=3;vair=0.5	13.106	13.189	2.178	505	31.126
<b>d=45mm</b>					
vfuel=3;vair=0.5	20.387	20.516	1.528	209	33.963
vfuel=5;vair=0.5	56.631	56.991	1.868	348	41.525

**Tabella 6: Stima altezza fiamma e potenza termica**

Le simulazioni CFD sono state quindi effettuate per tutte le condizioni sopra elencate; tali valutazioni computazionali sono state generate tramite l'adozione di flamelet all'equilibrio, ovvero trascurando l'effetto dello strain sulla temperatura di fiamma e sulla composizione, e solo per due casi mediante l'adozione di flamelet stretchate.

In Figura 31 si riporta uno dei primi risultati ottenuti con il codice di simulazione termo fluido dinamica messo a punto per l'applicazione sopra descritta. In particolare si può osservare il diagramma del profilo di temperatura previsto per una torcia a dimensioni scalate con diametro di stack di 70 mm, velocità del combustibile di 5 m/s e velocità dell'aria in camera di 0,5 m/s inserita all'interno del banco di studio precedentemente descritto.





**Figura 31: Mappa di Temperatura (Kelvin) per la geometria proposta. Velocità del combustibile 5 m/s, diametro stack 70 mm velocità aria in camera 0.5 m/s**

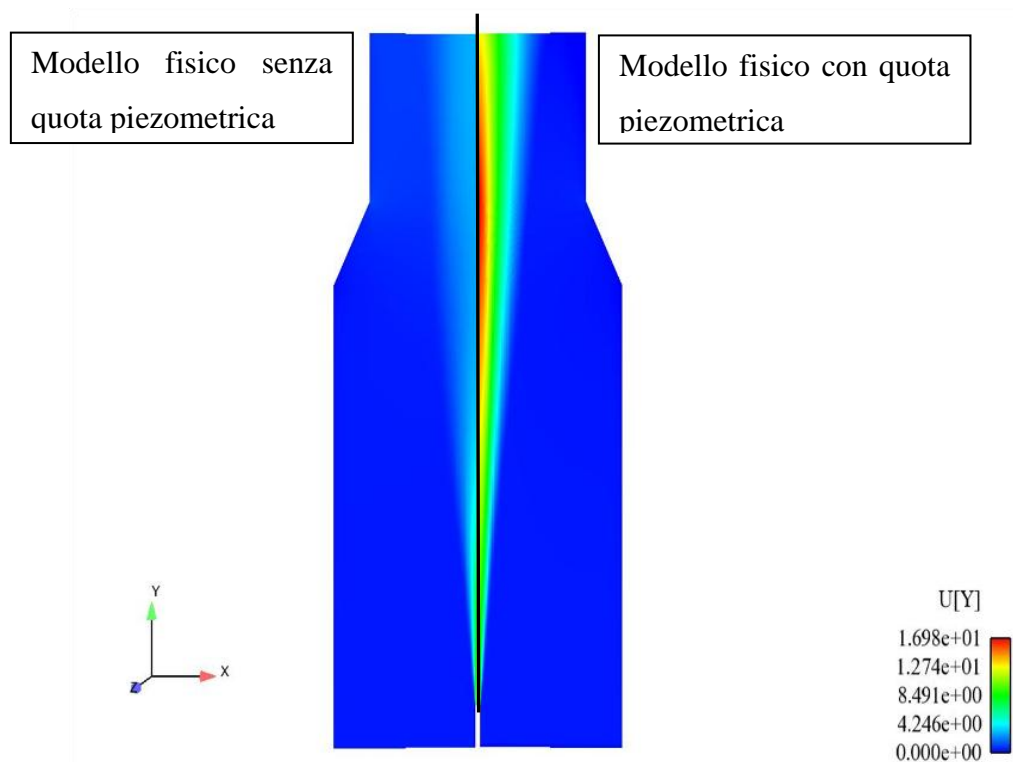
Dall'analisi sopra riportata si nota che già con 5 m/s di velocità d'efflusso del combustibile, la fiamma dalla camera (considerando i valori di altezza definiti con il software di avanprogetto) teoricamente superi in altezza le dimensioni del banco prova; ciò è dovuto alla struttura di moto che si crea a causa dell'ingresso radiale dell'aria e all'effetto camino generato dal geometria del banco. Come meglio descritto nel paragrafo seguente, l'alta velocità dell'aria comburente necessaria a contenere la temperatura di uscita dei gas dalla camera e la relativa direzione d'immissione assiale fanno sì che questa si concentri sull'asse, provocando il confinamento del getto di combustibile [10] ed il conseguente aumento della lunghezza della fiamma.

Alla luce di tali considerazioni, considerata possibile criticità del problema, si è pensato di rendere il modello fluidodinamico maggiormente robusto, così da investigare su possibili effetti secondari prodotti dall'interazione dei flussi in gioco.

Sempre durante questa fase di svolgimento del lavoro, sono stati anche implementati i modelli numerici [11] necessari per la stima della variazione di pressione atmosferica tra il punto di iniezione della fiamma e quello di uscita (quota piezometrica) dalla camera del banco di studio a dimensioni ridotte.

Tale caratterizzazione si è rivelata decisiva per la validità del modello CFD: viste le non trascurabili differenze di quota tra il punto d'iniezione e l'uscita della camera, è stato quindi aggiunto all'equazione del momento un termine che tenesse conto della corrispettiva variazione di pressione dovuta alla quota ( $z$ ).

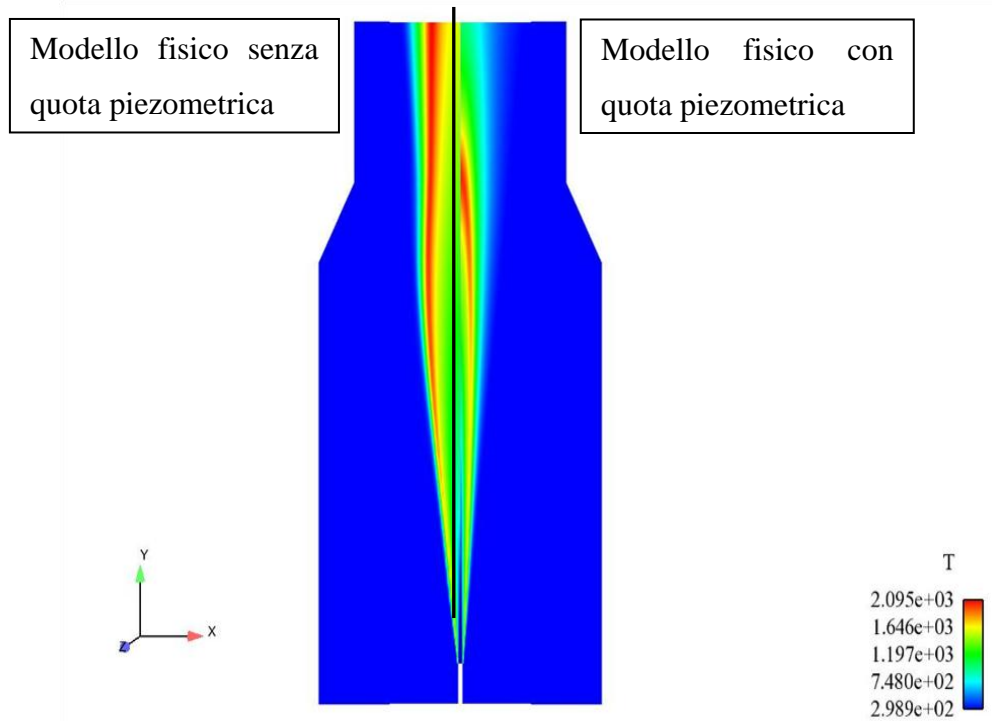
In Figura 32 è riportata la simulazione del campo di velocità derivante dal funzionamento di un prototipo di torcia all'interno banco di studio a dimensioni ridotte, ottenuta con il codice di calcolo implementato rispetto al variazioni di pressione sopra discusse. Nello specifico, nella parte sinistra della figura si riporta il campo di velocità derivante dall'applicazione del modello fisico che non tiene conto della quota piezometrica, mentre nella parte destra quello calcolato tenendo conto di tale fattore.



**Figura 32: Simulazione del campo di velocità della fiamma**

Dall'analisi della Figura 32, risulta evidente che la variazione della pressione atmosferica tra punto di iniezione e punto di uscita della fiamma, accelera in maniera sensibile il flusso della fiamma. La differenza di pressione comporta un'accelerazione del flusso e pertanto si può ben osservare come la condizione stechiometrica si sposti ad una quota maggiore, producendo conseguentemente uno spostamento verso l'alto della zona di massimo rilascio termico.

La Figura 33 riporta quindi la corrispondente variazione nel campo di temperatura: i campi di temperatura mostrati sottolineano l'efficacia della scelta modellistica effettuata.

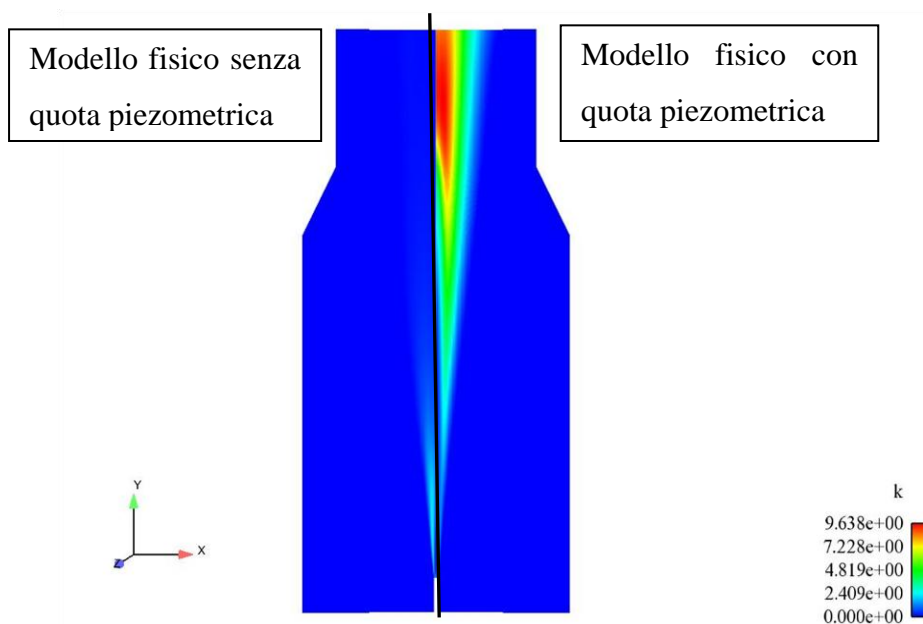


**Figura 33: Simulazione del campo di temperatura della fiamma.**

Anche in questo caso risulta evidente l'influenza della variazione di pressione atmosferica sulla distribuzione della temperatura della combustione; il campo di temperature generate cambia infatti la sua distribuzione lungo l'asse  $z$ , ottenendo complessivamente un abbassamento del fronte di fiamma.

Inoltre, come precedentemente richiamato, sfruttando la presenza di un database di modelli di turbolenza di tipo k-e, k-w, RSM, è stato possibile procedere ad una successiva implementazione del modello CFD, permettendo quindi ulteriori valutazioni sul sistema in studio.

Avvalendosi di tali modelli, è stato quindi possibile studiare, come evidenziato in Figura 34, la variazione dell'intensità di turbolenza ( $k$ ) all'interno della fiamma; anche in questo caso va osservato come il campo di turbolenza risulti completamente alterato rispetto a quanto ottenuto senza tale implementazione, determinando una miscelazione più intensa che impatta positivamente sull'altezza finale della fiamma.



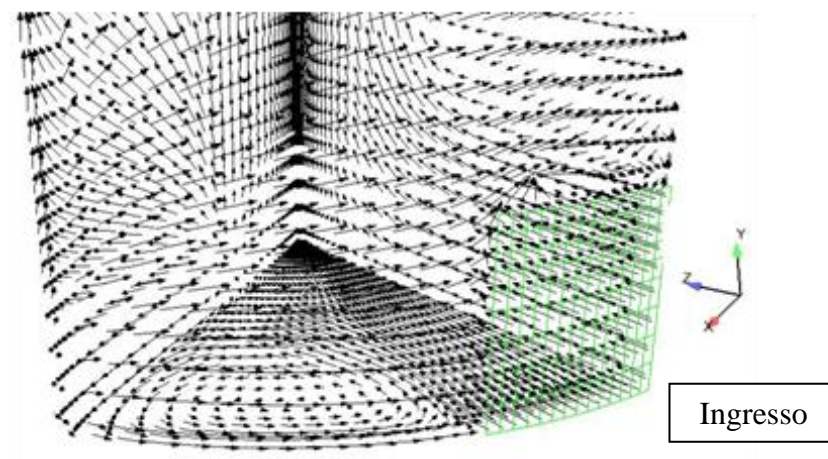
**Figura 34: Simulazione del campo di turbolenza della fiamma.**

La lunghezza della fiamma ottenuta da queste simulazioni tuttavia non è risultata essere ancora direttamente comparabile con quella fornita dalla correlazione utilizzata in fase di primo dimensionamento della camera; si è valutato quindi che tale effetto fosse fondamentalmente dovuto all'interazione del coflow, il cui effetto porta tipicamente a confinare la fiamma entro un'estensione radiale ridotta.

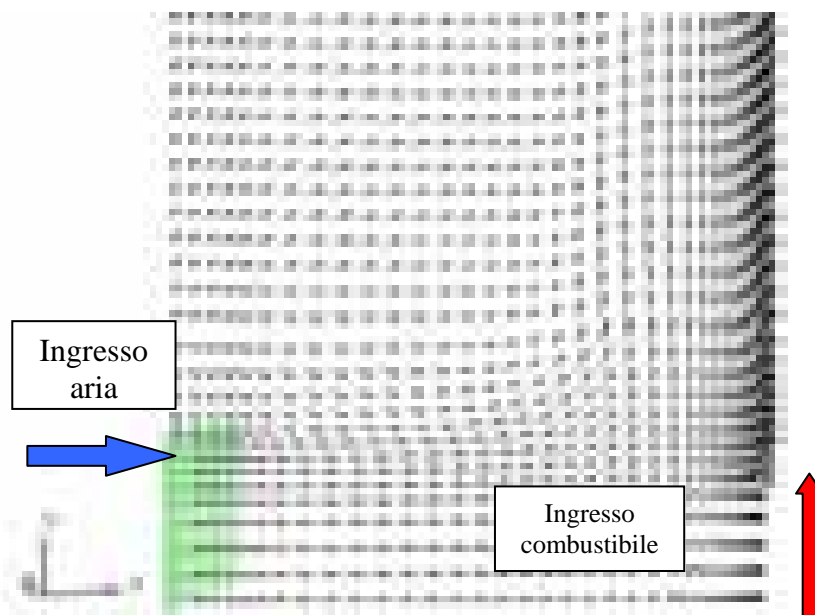
Per tale motivo è stato necessario procedere con ulteriori implementazioni del sistema di calcolo CFD, così da studiare con maggior dettaglio la fenomenologia della combustione prodotta all'interno del banco prova, considerandone in maniera molto dettagliata l'interazione stretta tra il flusso di aria comburente e il getto di combustibile immesso. Presa coscienza delle considerazioni di cui sopra, l'impatto dello scalar dissipation rate sulla fiamma diffusiva turbolenta risulta fondamentale e pertanto le simulazioni ottenute in questa prima fase del lavoro hanno permesso di sviluppare considerazioni ulteriori per l'ottimizzazione del dimensionamento della camera.

Una possibile soluzione al problema della formazione di fronti di fiamma eccessivamente allungati, da quanto ho ottenuto analiticamente dai modelli CFD, potrebbe essere data dall'incremento dell'altezza e della larghezza delle prese d'aria che nella fase avvanprogetto avrebbero occupato (per motivi strutturali)

solamente 1/3 della circonferenza di base del banco. Tuttavia l'analisi del campo di moto in prossimità del fondo della camera (Figura 35 e Figura 36) sconsiglia a priori l'utilizzo dell'ingresso radiale forzato dell'aria comburente. Tale configurazione infatti induce la formazione di importanti zone di ricircolo toroidali a forma di ferro di cavallo che avvolgono le tre correnti d'aria in ingresso. Queste strutture di moto possono provocare potenziali situazioni di pericolo, soprattutto in fase di accensione poiché potrebbero indurre l'accumulo di gas incombusti.

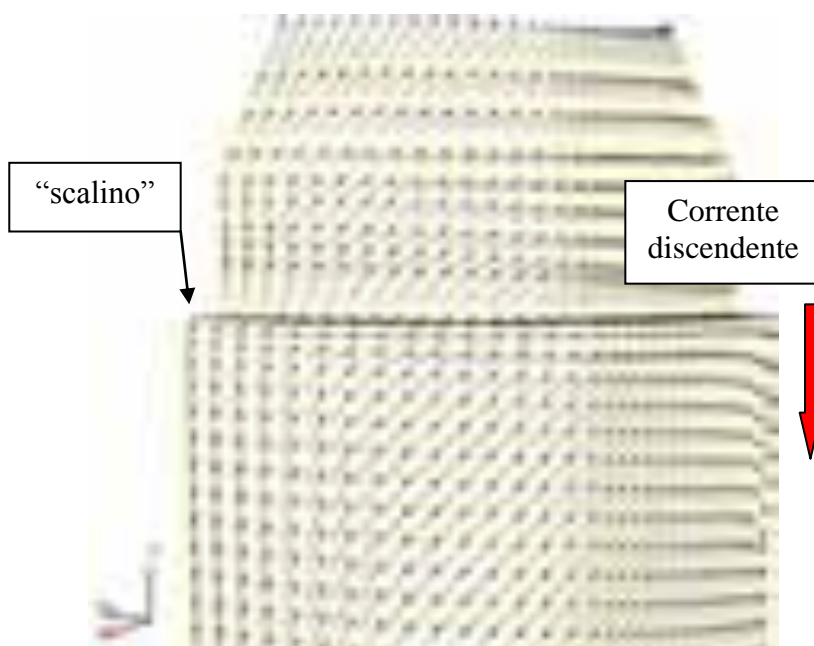


**Figura 35: Mappe vettoriale velocità sul fondo della camera in prossimità dell'ingresso aria.**



**Figura 36: Mappa vettoriale della velocità, vista laterale in prossimità ingressi aria e combustibile**

In figura 40 si rileva invece la presenza di un'altra criticità rispetto alla geometria inizialmente pensata, ovvero lo “scalino” tra camera e cappa. Questo infatti, interagendo con le succitate strutture di ricircolo, può indurre alla formazione di correnti discendenti, anch'esse potenziali fonti di accumulo del combustibile oltre che causa della riduzione effettiva della sezione utile alla combustione.



**Figura 37: Mappa vettoriale della velocità in prossimità del raccordo con la cappa**

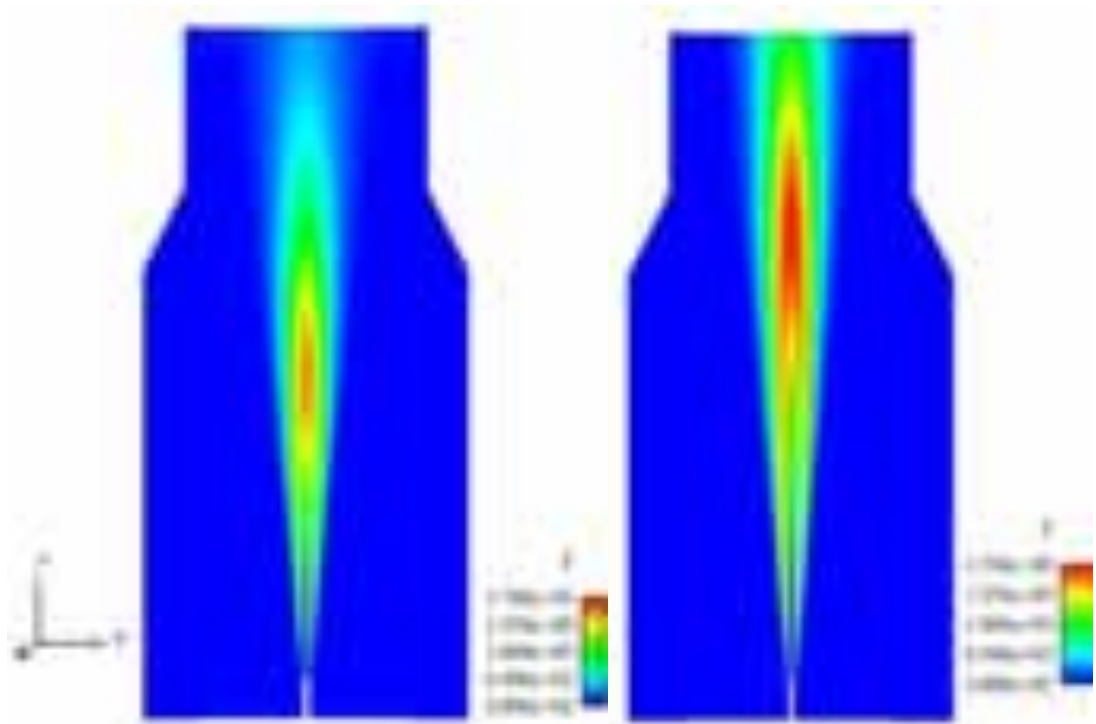
Le criticità evidenziate nell'analisi della geometria base hanno suggerito quindi alcune correzioni:

- ingresso assiale non forzato dell'aria dal fondo della camera
- eliminazione dello scalino in prossimità del raccordo tra camera e cappa

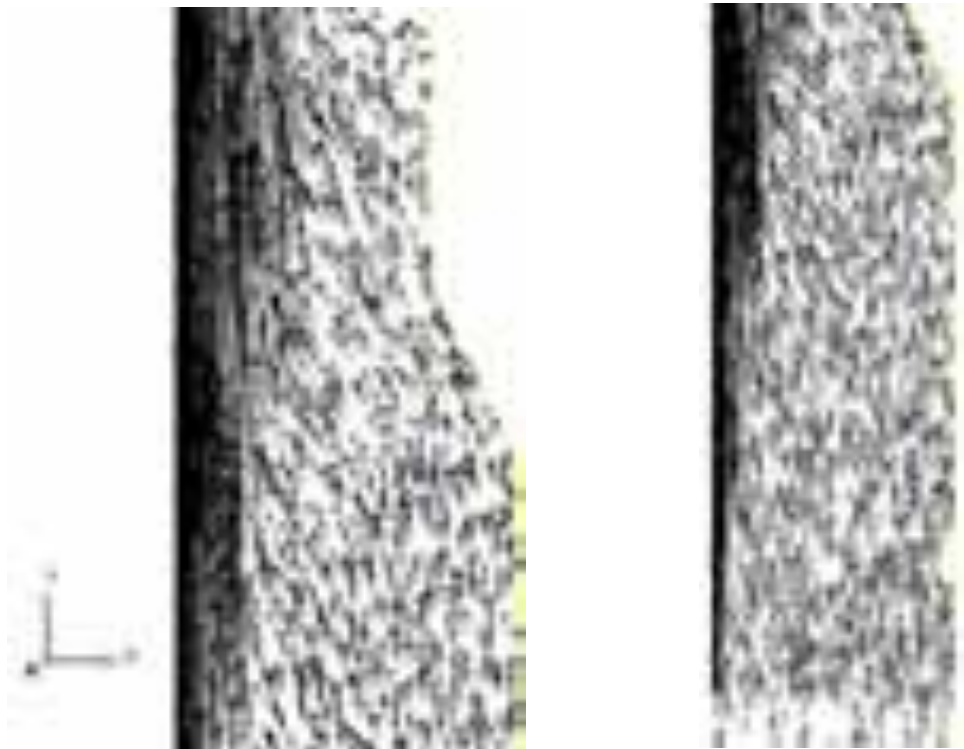
In Figura 38 si può notare che nella nuova configurazione simulata la fiamma, nonostante la velocità del combustibile di 5 m/s, presenta un'estensione completamente confinata all'interno dell'alzata della camera mentre con 10 m/s la fiamma esce solo in piccola parte.

Questo si giustifica, coerentemente con quanto studiato in questa prima fase del lavoro, con l'eliminazione delle strutture di ricircolo causate dalla geometria inizialmente valutata del banco; il campo vettoriale di moto dell'interazione tra i

flussi di aria comburente e di combustibile, questa volta privo dei suddetti ricircoli, è rappresentato in Figura 39.



**Figura 38:** Mappe di temperatura (Kelvin) per la geometria aggiornata a sinistra velocità fuel 5 m/s destra 10 m/s, diametro stack 70 mm velocità aria in camera 0.5 m/s



**Figura 39:** Mappe vettoriali di velocità per la geometria aggiornata con velocità del combustibile 5 m/s e coflow 0.5 m/s

Con la geometria aggiornata sono stati analizzati anche gli effetti del diametro dello stack e della velocità del coflow: con diametro 45 mm la fiamma, come ipotizzabile si accorcia, mentre la velocità del coflow, purché contenuta tra 0.5 ed 1 m/s, non influisce sulla lunghezza della fiamma. Per valori inferiori della velocità di coflow s'instaurano dei fenomeni d'ingestione di gas caldi dallo scarico oltre ad avere delle temperature più elevate.

Le nuove simulazioni effettuate hanno permesso così di definire e validare i criteri modellistici per l'analisi di questa tipologia di torce, nonché di ottenere informazioni necessarie al corretto dimensionamento della camera.

Di seguito (Tabella 7) si riportano in i confronti con le simulazioni CFD.

ID fiamma	Flame length	L/D correlazione	L FOAM Eq	L/D FOAM Eq	L FOAM FL	L/D FOAM FI
<b>d=70mm</b>						
vfuel=5;vair=0.5	2.665	38.0733	4.469	63.842	3.958	56.555
vfuel=5;vair=1	2.664	38.073	4.639	66.273	-	-
vfuel=10;vair=0.5	3.495	49.941	5.872	83.898	5.843	83.476
vfuel=3;vair=0.5	2.178	31.126	3.622	51.755	-	-
<b>d=45mm</b>						
vfuel=3;vair=0.5	1.528	33.963	2.208	49.084	-	-
vfuel=5;vair=0.5	1.868	41.525	3.198	71.072	-	-

**Tabella 7: Confronto tra altezza fiamma da correlazione e da simulazione**

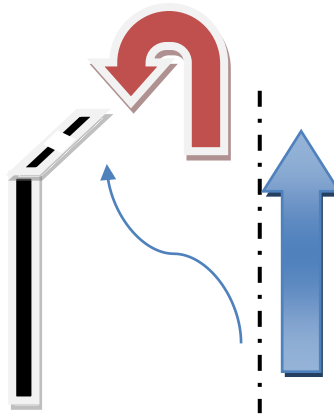
Questa prima fase di analisi numerica CFD ha permesso di ottenere un corretto dimensionamento del banco, in funzione del tipo di combustione generata al suo interno per la validazione di prototipi scalati di torce industriali. Tuttavia essendo oggetto dell'indagine in questione proprio la realizzazione di nuove teste di combustione, il progetto ha previsto una seconda fase di analisi numerica per la messa a punto sia dei dispositivi per la generazione delle fiamme pilota che delle geometrie strutturali per la definizione stack delle flares.

Pertanto, ulteriori indagini sono state dedicate alla modellizzazione del sistema di iniezione. Nelle simulazioni effettuate durante lo svolgimento delle simulazioni CFD all'interno del banco prova, come si può notare nelle figure riportate, lo stack è sempre stato modellato come un tubo cilindrico. Una più dettagliata descrizione della geometria, comprensiva di quelle caratteristiche



geometriche che contraddistinguono le teste di combustione per torce industriali, permetteranno di operare un opportuno dimensionamento dei sistemi al buon in termini di ancoraggio della fiamma, riduzione del fenomeno di smoke di cui precedentemente discusso, stabilità e risposta ai transitori di accensione e spegnimento.

Con riferimento alla Figura 40, il modello concettuale per l'analisi delle teste, prevede di valutare la ripartizione dei flussi dall'interno del canale e di studiarne quindi la zona immediatamente a valle, dove si suppone il ricircolo indotto dall'ostacolo determini una zona a miscelazione intensa atta alla stabilizzazione della fiamma. Tale argomentazione sarà affrontata con dovizia di dettaglio nel terzo capitolo.



**Figura 40: Modello concettuale della ripartizione del flusso di combustibile sulla geometria dello stack**

### *1.20 CONCLUSIONI*

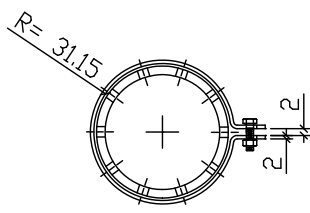
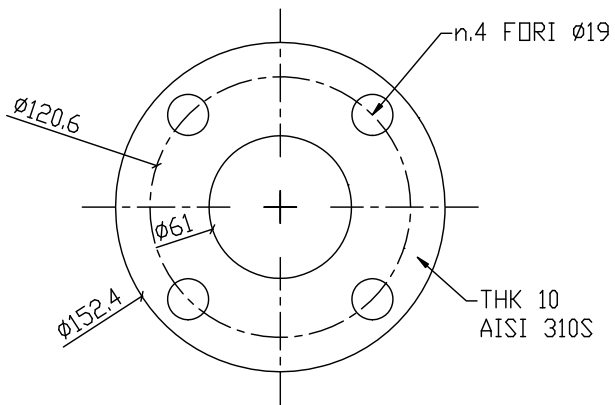
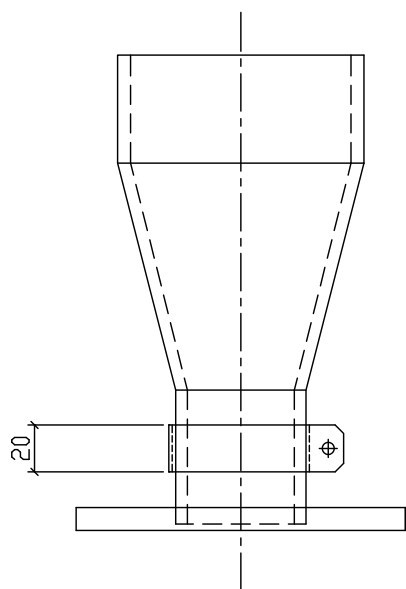
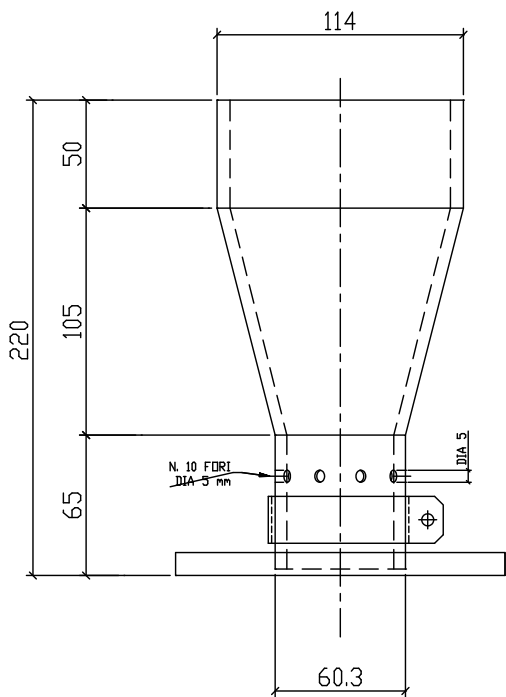
I test svolti durante questa fase preliminare del lavoro hanno dimostrato quindi da un lato la stabilità del sistema di calcolo CFD messo a punto e dall'altro hanno evidenziato la sua capacità di descrivere i fenomeni fisici che avvengono nel banco di studio a dimensioni ridotte, permettendone pertanto un dimensionamento più appropriato rispetto quanto ottenibile con modelli zero dimensionali.

L'analisi CFD ha permesso quindi di correggere la geometria precedentemente proposta col fine di soddisfare le specifiche richieste. Tali specifiche progettuali, ricavate dalla fase di studio e di dimensionamento del banco, hanno portato alla luce quindi la fattibilità realizzativa per una camera in grado di operare con stack

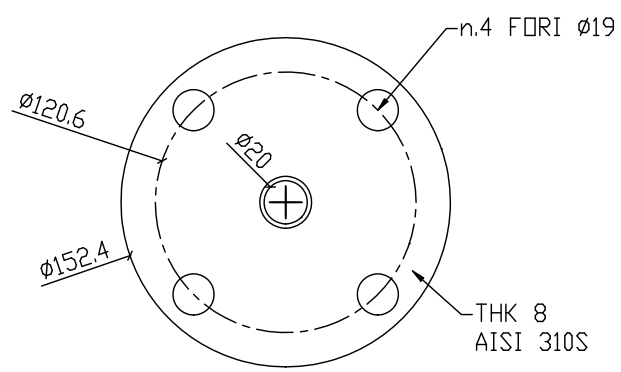
di diametri fino a 70 mm e velocità di efflusso fino 5 m/s al secondo. Cautelativamente tali valutazioni, sono state effettuate con un combustibile composto in massa dal 50.51 % di metano e 49.49 % di propano per riprodurre le caratteristiche del combustibile della flare di riferimento. La scelta di tali percentuali garantisce la piena funzionalità del banco con un tipo di gas tecnico che con buona probabilità presenta un potere calorifico sicuramente superiore rispetto a quello ottenibile da un tail gas di processo. Per evitare problemi d'integrazione fra i flussi di aria comburente e di combustibile immesso nel sistema, si è visto che la camera non deve presentare scalini in ingresso alla sezione convergente posta sulla sua sommità. Allo stesso modo l'inserimento radiale forzato di aria tramite un sistema di aspirazione da un'unica finestra posta sulla base del banco non risulta vantaggiosa sia in termini di allungamento della fiamma che per il rischio della formazione di ricircoli in indesiderati; per tale motivo come accennato nei paragrafi precedenti e ampiamente discusso nel capitolo 2, nella realizzazione del banco si opterà per un'aspirazione forzata posta a valle di una tubazione di estrazione dei gas discendente, collegata alla camera sulla sua sommità.

Così facendo la camera è in grado di operare i test sperimentali sulle torce, sia utilizzando il combustibile stoccato in loco (metano e propano), sia con possibili forniture ricavate direttamente dagli impianti realmente funzionanti.

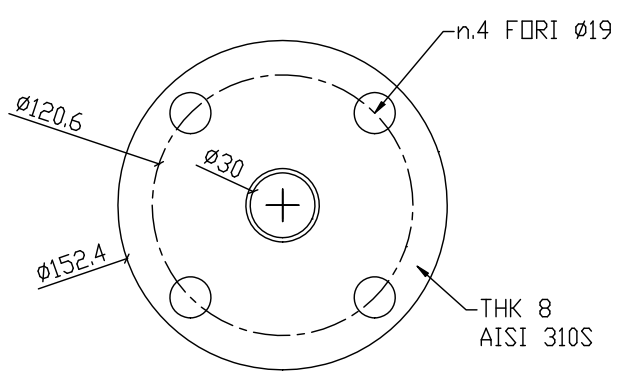




## BRUCIATORE TIPO 2

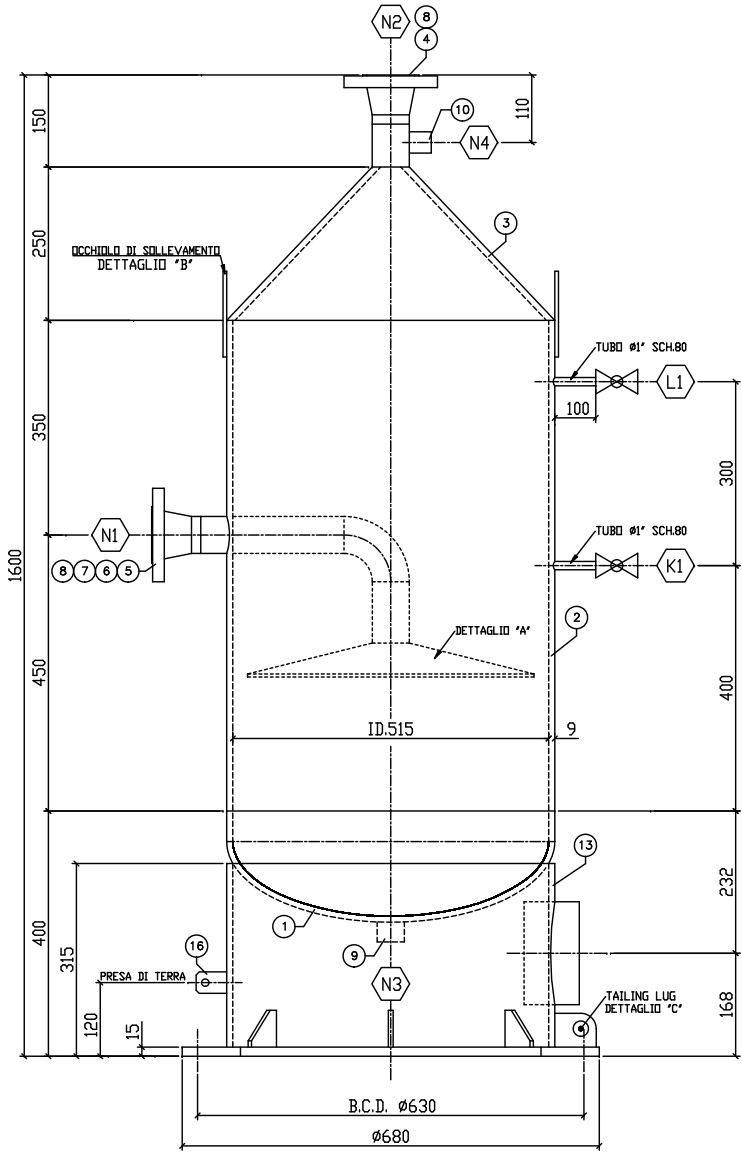


## DIAFRAMMA FORO $\phi 20$

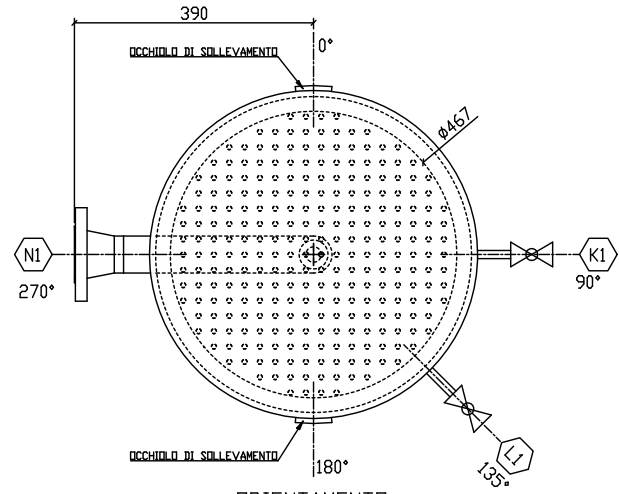


## DIAFRAMMA FORO $\phi 30$

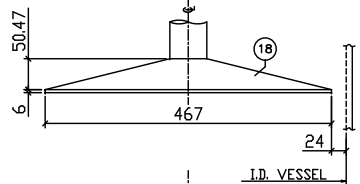
0	EMESSO PER APPROVAZIONE	MAZZEO	MAZZEO	CHIARELLI	-	07/01/10
REV.	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	REQ. PREP.	CONTR. CHKD	APP. APPED	Q.C.	DATE
		VESSEL NUMBER: --		COMM. JOB BANCO PROVA		
ROMBIOLO (VV)		ITEM: --		DIS. N° DWGN. B/010		
TITOLO TITLE BRUCIATORE TIPO 2				SCALA/SCALE	SEL	REV.
SOSTITUITO DA - REPLACED BY				N.A.	1/1	0



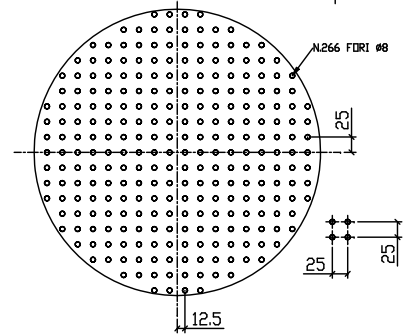
VISTA IN ELEVAZIONE



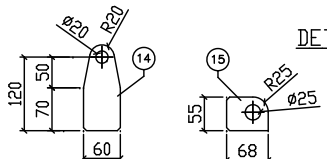
ORIENTAMENTO



I.D. VESSEL



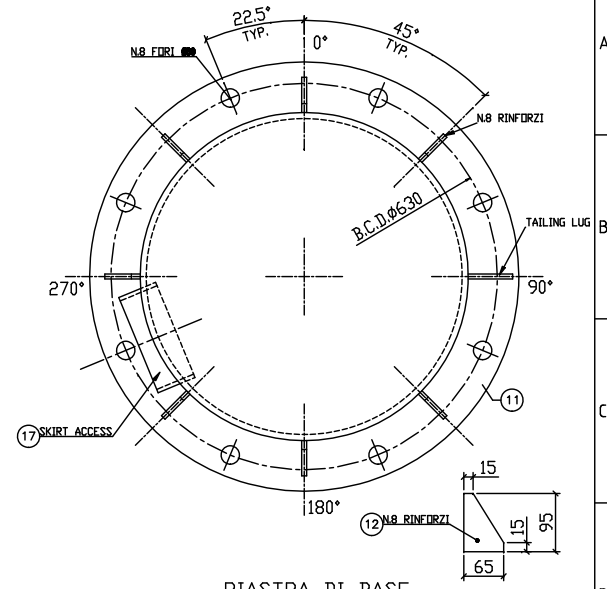
DETTAGLIO "A"



DETT. "B" DETT. "C"

POSITION NOZZLE	Ø	SERVICE	NOMINAL SIZE (NPS)	ASME PRESSURE CLASS	SCHEDULE/THICKNESS
L1	1"	INGRESSO ACQUA	1"	VALVOA A SFERA	-
K1	1/2"	LIVELLO ACQUA	1/2"	LIVELLO	-
N4	1/2"	PRESSOSTATO	1/2"	MEZZO MANICOTTO #3000 NPT	-
N3	1"	DRENAGGIO	1"	MEZZO MANICOTTO #3000 NPT	-
N2	2"	USCITA GAS	2"	WN #150 RF	SCH 80
N1	2"	INGRESSO GAS	2"	WN #150 RF	SCH 80

**NOZZLES**



PIASTRA DI BASE

ITEM	DESCRIPTION / DIMENSION	Q.TY	MATERIAL
18	LAMIERA FORATA	1	OD. 467 - 6 THK A 516 Gr 60
17	ACCESSO ALLA GONNA	1	TUBO 6" SCH 40 A 106 Gr B
16	PRESA DI TERRA	1	35 x 50 x 6 THK A 240 TP 304
15	OCCHIOLO	2	120 x 60 x 9 THK A 516 Gr 60
14	OCCHIOLO	1	68 x 95 x 9 THK A 516 Gr 60
13	GONNA / SKIRT	1	295 x 1680 x 9 THK A 516 Gr 60
12	RINFORZI	8	65 x 95 x 9 THK A 516 Gr 60
11	PIASTRA DI BASE	1	OD. 700 - 20 THK A 516 Gr 60
10	MEZZO MANICOTTO #1/2" #3000 NPT	1	MEZZO MANICOTTO #1/2" #3000 NPT A 105
9	MEZZO MANICOTTO #1" #3000 NPT	1	MEZZO MANICOTTO #1" #3000 NPT A 105
8	FL WN #2" #150 RF SCH 80	2	A 105
7	TUBO #2" SCH 80	1	A 106 Gr B
6	CURVA #2" LR 90° SCH 80	1	A 234 WPB
5	TUBO #2" SCH 80	1	A 106 Gr B
4	TUBO #2" SCH 80	1	A 106 Gr B
3	LAMIERA PER CONO	1	350 x 1680 x 9 THK A 516 Gr 60
2	LAMIERA PER MANTELLO	1	800 x 1680 x 9 THK A 516 Gr 60
1	FONDO P/E 2x1	1	OD. 535 - 9 THK A 516 Gr 60

LISTA MATERIALI / MATERIAL LIST

REV.	DESCRIZIONE - DESCRIPTION	ESBG. PREP'D	MAZZEO CONTR. CHICD	CHIARELLI APPR. APPRD	Q.C.	DATE
0	EMESSO PER APPROVAZIONE					11/03/09

<b>GAM</b>	VESSEL NUMBER: --	COMM. JOB -
	ITEM: --	
<b>WATER SEAL GPL - METANO</b>		DIS. N° B/002 DWGN.
SOSTITUITO DA - REPLACED BY		SCALA/SCALE N.A. SEL. 1/1 REV. 0



