

Simulazione e analisi fisica del comportamento
di sorgenti di plasma termico per il taglio di
materiali metallici in differenti condizioni
operative

Olaf Marzocchi

12 dicembre 2004

Indice

1	Le torce al plasma	5
1.1	Struttura delle torce al plasma e principio di funzionamento	6
1.2	Le torce ad arco non trasferito	8
1.3	Le torce ad arco trasferito	8
1.4	L'innesco dell'arco	10
1.5	Applicazioni industriali	11
2	Simulazione numerica	13
2.1	Metodi di simulazione numerica	14
2.2	Impostazione del problema numerico	15
3	Analisi dei risultati	19
3.1	Simulazione a freddo	19
3.1.1	Impostazione del problema	19
3.1.2	Risultati	20
3.2	Simulazione con arco non trasferito	28
3.2.1	Impostazione del problema	28
3.2.2	Risultati	30
3.3	Simulazione con arco trasferito	46
3.3.1	Impostazione del problema	46
3.3.2	Risultati	46
4	Conclusioni e prospettive future	57

Introduzione

Le torce al plasma ad arco sfruttano la tecnologia degli archi voltaici, nota a livello di ricerca da ormai due secoli ed applicata a livello industriale per il taglio dei materiali da decenni: i primi studi sulle scariche ad arco risalgono a Davy, nel 1813 (cfr. [2]), e le applicazioni nel campo del taglio al 1957 (cfr. [1] e [3]). Tale tecnologia è in grado di generare elevatissimi flussi di calore – molto richiesti dai processi dell’industria moderna – i quali, essendo in grado di arrivare fino a densità di potenza di 10^{12} W/m² con velocità del getto di plasma di 10^3 m/s, permettono di velocizzare notevolmente i processi industriali e, al tempo stesso, di abbattere i costi di lavorazione. Allo stato attuale, i principali campi di utilizzo delle torce ad arco sono infatti il taglio di materiali metallici, il trattamento di rifiuti, la “*chemical vapor deposition*” e la preparazione di polveri ultrafini ed ultrapure.

Il presente lavoro si inserisce all’interno del progetto di collaborazione tra Cebora S.p.A. ed Università di Bologna - Facoltà di Ingegneria, progetto che prevede nella prima fase la modellazione al calcolatore della fluidodinamica della torcia commerciale CP160 nelle condizioni di arco spento, di ‘arco pilota’ e di arco trasferito (con simulazione di un taglio). La mia attività si è incentrata sulla fase di modellazione bidimensionale stazionaria del problema, con l’obiettivo di produrre dati preliminari utili alle successive simulazioni tridimensionali e/o dipendenti dal tempo. Le condizioni al contorno imposte nel presente lavoro si discostano infatti dalla situazione reale, in quanto, per poter analizzare i fenomeni in due dimensioni, si è ipotizzata una assialsimmetria del sistema non presente nella realtà.

Nel **Capitolo 1**, “*Le torce al plasma*”, sarà descritto il principio di funzionamento delle torce ad arco, sia nel caso trasferito che nel caso non trasferito, ed i loro possibili impieghi in campo industriale.

Nel **Capitolo 2**, “*Simulazione numerica*”, verrà mostrato il principio di funzionamento del programma utilizzato ed il procedimento seguito durante l’impostazione del problema al calcolatore.

Nel **Capitolo 3**, “*Analisi dei risultati*”, si prenderanno in esame i risultati conseguiti e le difficoltà incontrate.

Nel **Capitolo 4**, “*Conclusioni e sviluppi futuri*”, si analizzeranno possibili vie alternative per lo studio delle torce al plasma – quali ad esempio simulazioni 3D –, evidenziando vantaggi e svantaggi rispetto alle simulazioni 2D assialsimmetriche trattate nel presente lavoro.

Capitolo 1

Le torce al plasma

Il plasma può essere considerato come il quarto stato della materia, giacché una parte degli atomi in esso si trova in stato ionizzato. La conseguente presenza di elettroni non legati agli atomi originari permette al gas – normalmente un buon isolante – di condurre l'elettricità. Poiché l'energia posseduta dagli atomi segue una distribuzione statistica, ovvero le sue proprietà variano con continuità, non è possibile definire la temperatura alla quale il gas diventa plasma. Aria e argon, due gas di frequente utilizzo, si considerano convenzionalmente nello stato di plasma a temperature di circa 6000 K, in corrispondenza delle quali sono già in grado di condurre l'elettricità.

Per riscaldare il gas fino a temperature tali da renderlo plasma esistono tre tecniche principali: utilizzo di archi elettrici (torce ad arco), utilizzo di scariche accoppiate induttivamente al plasma (torce ad induzione), utilizzo di radiazione ultravioletta (cfr. [10]).

Le **torce al plasma ad arco** sono caratterizzate da notevole compattezza ed economicità: le loro dimensioni ed i loro costi le rendono utilizzabili sia in cantieri edili, come strumento portatile per tagliare metalli, sia in grosse installazioni industriali, nelle quali trovano applicazione a partire dai processi metallurgici più tradizionali, quali fusione e taglio di metalli, fino a quelli più tecnologici, quali produzione di polveri fini e decomposizione di materiali pericolosi.

Le **torce al plasma ad induzione**, al contrario, sono caratterizzate da un investimento iniziale di almeno un ordine di grandezza superiore, in grado però di restituire plasmi con purezze non altrimenti ottenibili nelle 'sporche' torce ad arco: queste ultime hanno consumabili a diretto contatto col plasma, del tutto assenti nelle torce ad induzione. Le applicazioni industriali di questo tipo di torce rispecchiano le caratteristiche appena esposte, spaziando dalla

produzione di polveri ultrafini alla deposizione di vapori ultrapuri (la silice impiegata nella produzione di fibre ottiche ne è un esempio).

Nel presente lavoro saranno trattate solo torce del primo tipo, le torce al plasma ad arco, delle quali nel presente capitolo si illustrano le differenti tipologie.

1.1 Struttura delle torce al plasma e principio di funzionamento

La struttura di un sistema con torcia al plasma ad arco è costituito da cinque elementi fondamentali:

- un generatore, in grado di fornire alla torcia una corrente costante (continua o alternata), selezionabile in base alle condizioni di lavoro;
- un elettrodo che svolge la funzione di catodo, che emette cioè gli elettroni;
- un elettrodo che svolge la funzione di anodo, raccogliendo gli elettroni;
- un gas di lavoro che verrà riscaldato, scelto in base all'impiego previsto per la torcia: le alternative più comuni (cfr. [9]) sono: aria, economica ma che causa ossidazione del catodo e del pezzo da trattare o loro nitrificazione; argon/idrogeno, per i tagli più profondi e per l'utilizzo con le correnti più elevate (fino a 1000 A); ossigeno, che permette i tagli più precisi; azoto, per ottenere i migliori risultati con alluminio o acciaio al carbonio e per ottenere una lunga vita del catodo;
- un sistema di raffreddamento (ad aria o ad acqua), incaricato di asportare calore dagli elementi sottoposti ad alti flussi termici e di evitare la fusione o l'eccessivo consumo degli elettrodi.

Le possibili modalità con cui il catodo emette elettroni sono due, l'effetto termoionico e l'emissione per effetto di campo ("*field effect emission*"). La prima sfrutta l'energia termica ($\bar{E} = 3/2kT$) per far superare agli elettroni la barriera di potenziale, il che richiede temperature prossime ai 3000 K, possibili solo con materiali refrattari quali tungsteno o afnio, aventi temperature di vaporizzazione superiori a 4500 K. Il processo si può autosostenere anche a temperatura e pressione ambiente, in quanto gli ioni positivi che impattano sul catodo (detto 'caldo' per le temperature raggiunte) lo mantengono ad elevata temperatura.

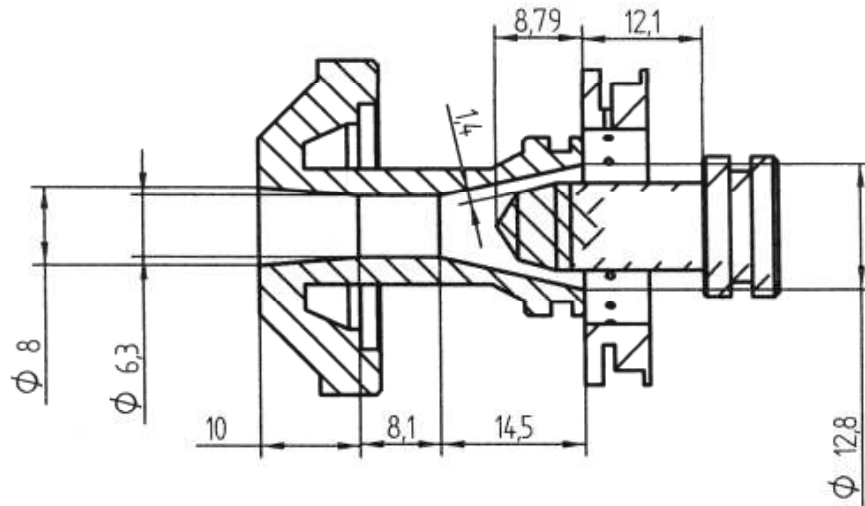


Figura 1.1: Schema di una torcia ad arco non trasferito (cfr. [4]). Le dimensioni sono espresse in mm.

L'emissione per effetto di campo, invece, mediante campi elettrici fornisce agli elettroni energia sufficiente a far loro superare per 'effetto tunnel' la barriera di potenziale. Questo metodo non richiede alte temperature e può essere quindi utilizzato anche con materiali più economici quali il rame e le sue leghe. I catodi in cui si ha emissione di campo sono detti 'freddi'.

Le due differenti modalità di emissione comportano differenti comportamenti dell'attaccatura della scarica di plasma sul catodo. Nel caso dell'emissione di campo l'attaccatura è puntiforme – con conseguenti alti valori della densità di corrente, prossimi a 10^{11} A/m² – ed è in rapido movimento sulla superficie; l'emissione termoionica è invece distribuita su tutta la superficie attiva del catodo, con valori della densità di corrente più bassi di alcuni ordini di grandezza (10^6 - 10^8 A/m²) e variabili da punto a punto in funzione della temperatura raggiunta.

Nelle simulazioni al computer (effettuate su un catodo caldo) si è deciso di ipotizzare una distribuzione parabolica della corrente sulla zona attiva dell'afnio (il materiale refrattario usato) con il picco al centro, la zona più calda.

L'anodo nelle torce ad arco può assumere svariate configurazioni e determinare il tipo stesso di torcia, per cui se ne tratta più diffusamente nelle seguenti sezioni, 1.2 e 1.3.

1.2 Le torce ad arco non trasferito

Le torce ad arco non trasferito sono caratterizzate dalla richiusura dell'arco all'interno della torcia, per cui l'anodo fa parte della torcia stessa. Quella mostrata in figura 1.1 è un esempio di torcia ad arco non trasferito: in essa il flusso elettronico (di qui in poi indicato genericamente come arco) parte dall'elettrodo, posizionato centralmente nella parte di destra della figura 1.1, e si richiude sull'anodo, che costituisce la parte più a sinistra della torcia. L'arco risulta quindi confinato completamente all'interno del condotto ed eliminati alla radice tutti i possibili problemi di stabilizzazione che si avrebbero per un arco esterno alla torcia.

Il gas può essere immesso nella camera del plasma (la zona, di fronte al catodo, che il gas attraversa prima di uscire dall'ugello) in maniera coassiale, mediante un vortice o tangenzialmente (vedi Figura 1.2). L'ultima soluzione è preferibile per due ragioni: essa causa nel gas un moto di rotazione attorno all'asse (*swirl*) che porta l'attaccatura della scarica a ruotare continuamente sull'anodo, evitando così la formazione di punti caldi che lo condurrebbero ad erosione accelerata; secondo vantaggio di questa modalità di iniezione è che il fluido freddo, a causa della forza centrifuga e della maggior densità rispetto al getto caldo centrale, viene confinato nella parte più esterna del condotto, contribuendo a ridurre la dispersione termica delle pareti stesse.

1.3 Le torce ad arco trasferito

La caratteristica che differenzia le torce ad arco trasferito da quelle ad arco non trasferito è la funzione di anodo svolta dal pezzo da trattare: la scarica non termina in un condotto interno o su un componente della torcia, bensì all'esterno, come si può osservare nella figura 1.3, che mostra il modello più semplice di torcia ad arco trasferito, quella ad arco libero.

La configurazione ad arco trasferito è la preferita per tutte le applicazioni in cui sono richiesti i più alti flussi termici (quali il taglio di materiali, la fusione e la decomposizione di materiali pericolosi) per via dei valori di picco raggiungibili, pari a 10^{12} W/m². Tale valore dipende da molteplici fattori, fra i quali particolarmente importanti sono le caratteristiche fisiche del gas di plasma ed in particolare una alta conducibilità termica (i gas migliori sotto questo aspetto sono, infatti, idrogeno ed elio), la geometria del catodo e la distanza torcia-pezzo da trattare, in quanto l'aumento di quest'ultimo valore – entro certi margini – porta ad un restringimento dell'attaccatura della scarica

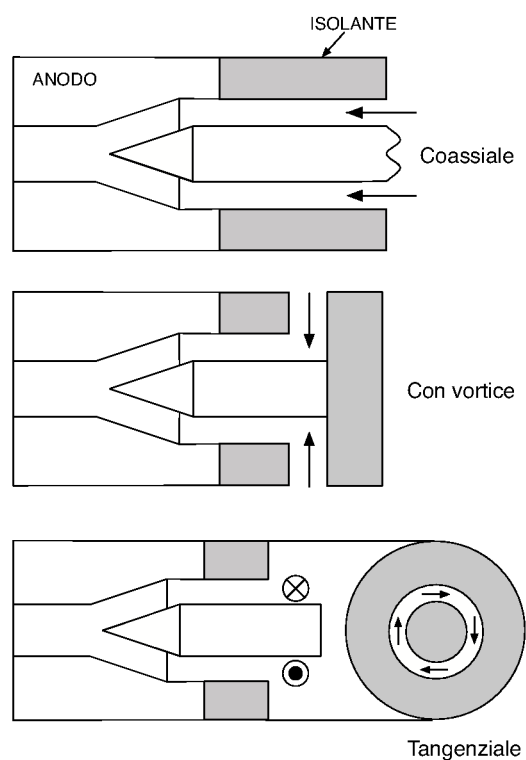


Figura 1.2: Possibili metodi di iniezione del gas in una torcia ad arco.

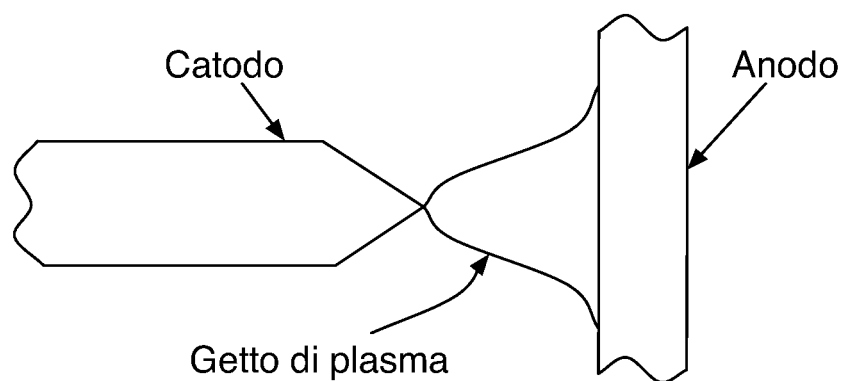


Figura 1.3: Schema del modello minimo di torcia ad arco trasferito, cosiddetto "free burning arc".

sull'anodo e conseguentemente un aumento del flusso termico per unità di superficie.

1.4 L'innesco dell'arco

L'innesco della scarica in torce ad arco si può avere, nei casi di interesse pratico, in due modalità: mediante scariche in radiofrequenza (la lunghezza d'onda dell'impulso può arrivare anche a 15 m) ad alto voltaggio (la tensione supera i 10.000 V) o mediante avvicinamento degli elettrodi a differenza di potenziale costante. Entrambe mirano a creare, mediante la rottura del dielettrico (il gas presente), un piccolo arco in grado di riscaldare una colonnina di gas che, una volta raggiunte le condizioni di plasma, si autosostenterà grazie al passaggio di corrente dovuto al campo elettrico presente. La preferenza per l'una o per l'altra modalità dipende dagli obiettivi che si cerca di raggiungere e dalle difficoltà che si incontrano: l'utilizzo di scariche in radiofrequenza comporta un aumento di complessità nel generatore, che deve fornire anche le scariche in radiofrequenza, mentre la testa della torcia rimane priva di parti in movimento. Questo comporta una maggiore solidità ed una costruzione più economica. Gli svantaggi delle scariche in radiofrequenza sono la dispersione che si ha lungo il cavo che porta segnale e potenza alla torcia ed essendo gli impulsi molto brevi, il vincolo sulla lunghezza del cavo stesso: esso deve essere inferiore alla lunghezza d'onda dell'impulso, calcolabile come $\lambda = 2c/3T$. Aggirare questi problemi è facile, ma si rende possibile solo con torce da installare su pantografo: la generazione della radiofrequenza viene spostata alla fine del cavo di alimentazione, in prossimità cioè della testa della torcia.

Le torce ad arco non trasferito, una volta accese, si trovano già nella condizione di funzionamento a regime: la scarica interessa catodo ed anodo. Le torce ad arco trasferito, invece, possono accendersi o direttamente sul pezzo (la condizione a regime), o in modalità di arco non trasferito (detto anche 'arco pilota', vedi 1.4), utile per stabilizzare la scarica nella fase iniziale. In quest'ultimo caso, la scarica verrà trasferita sul pezzo da trattare quando questo sarà avvicinato a sufficienza alla torcia.

La torcia Cebora CP160, studiata nel presente lavoro, è una torcia per il taglio di materiali metallici che sfrutta scariche in radiofrequenza per l'accensione e lo stadio di arco pilota per la stabilizzazione iniziale della scarica. Dopo gli impulsi iniziali, con voltaggio superiore a 10.000 V, inviati agli elettrodi (catodo ed ugello), appena sia rilevato il passaggio di corrente, e quindi la presenza di plasma, la corrente è impostata su un valore predeterminato, sufficiente ad autosostenere l'arco pilota. Il passaggio alla condizione di arco

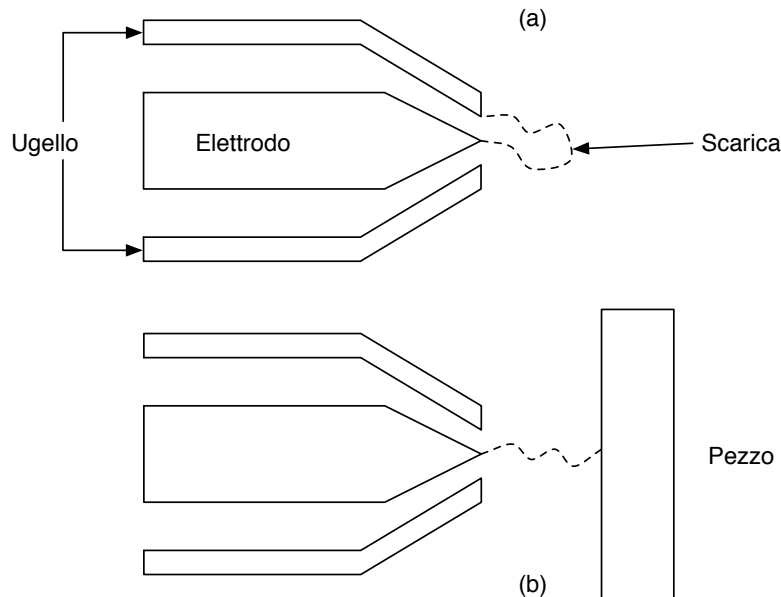


Figura 1.4: Schema torcia in modalità (a) di arco pilota (arco non trasferito) e (b) di arco trasferito sul pezzo.

trasferito si ha, invece, solo quando il pezzo da tagliare viene avvicinato all'ugello della torcia, condizione rilevabile mediante un "reed" magnetico, attivato dal passaggio di corrente sul pezzo da tagliare.

1.5 Applicazioni industriali

Gli impieghi a livello industriale delle torce ad arco sono legati agli alti valori di densità di energia e temperatura raggiunti, abbinati alle potenze erogabili di 1 MW ed oltre, che, in base alle specificità dei singoli modelli, si traducono nelle seguenti applicazioni:

1. *deposizione di strati di rivestimento o di film su un substrato già presente.* Tale tecnica può essere eseguita mediante *plasma spraying* (iniezione di polveri in un plasma, con conseguente riscaldamento e successivo deposito sul substrato), oppure tramite la *chemical vapor deposition* (le particelle all'interno del plasma passano allo stato di vapore ad alta densità, prima di depositarsi sul substrato).
2. *sintesi di polveri fini:* le alte temperature raggiunte avviano reazioni

chimiche che portano alla formazione di particelle solide ad alta densità e di piccole dimensioni, indipendentemente dallo stato (gassoso, liquido o solido) di partenza.

3. *decomposizione di materiali.* Le alte temperature raggiunte dal getto permettono di rompere i legami chimici presenti nelle molecole iniettate, così da ridurre molecole tossiche o altrimenti pericolose ai loro costituenti elementari. L'utilizzo di torce al plasma per effettuare questi trattamenti è particolarmente vantaggioso in quanto il processo è veloce e le dimensioni dei reattori contenute. Si possono, in aggiunta, recuperare le scorie prodotte per poi stoccarle, avvantaggiandosi della riduzione di volume e della vetrificazione che queste hanno subito durante il processo.
4. *processi metallurgici.* Questi includono la fusione, caratterizzata dalle più alte correnti circolanti (600 A ed oltre) e potenze dissipate (1 MW), la marcatura (per la quale le torce ad arco non trasferite sono preferite) ed il taglio di metalli. La gamma di modelli progettati per quest'ultimo partono da torce portatili a basso amperaggio, in grado di tagliare sino a 35 mm di ferro, fino a torce ad alto amperaggio fisse, in grado di tagliare spessori di 5 cm ed oltre o di raggiungere velocità di taglio di alcuni m/s. Nelle torce da taglio, il pezzo da tagliare funge da anodo, fondendo durante il processo. Il getto di gas ad alta velocità – 10^3 m/s – spazza poi via il metallo fuso.

Nel campo delle torce da taglio, a partire dagli anni '90, si è iniziato a parlare di torce 'ad alta definizione', un termine che non corrisponde a nessun brevetto in particolare, ma che identifica una serie di tecnologie in grado di collimare più efficacemente il getto, così da elevare la sua densità energetica fino a valori prima appannaggio dei soli laser (esempi sono il "vortex nozzle", meccanico, di Hypertherm e il "razor cutting", magnetico, di Comatsu).

Capitolo 2

Simulazione numerica

La conoscenza degli archi voltaici, come già accennato, risale a due secoli fa, tuttavia il livello di comprensione di questi fenomeni è cambiato molto nel corso del tempo: se inizialmente gli strumenti non permettevano misurazioni ad alta precisione e ad alta velocità, queste si sono rese possibili nel ventesimo secolo, consentendo il miglioramento della comprensione del fenomeno ed anche il suo utilizzo a livello industriale.

I metodi tradizionali rimanevano, comunque, caratterizzati dalla difficoltà di effettuare misure di precisione all'interno del getto, per i gradienti termici e le temperature critiche per gli strumenti di misura. L'avvento dei calcolatori, negli anni '80, ha cambiato questa situazione, permettendo di simulare le leggi fisiche che regolano tali scariche e quindi di conoscere con ancora maggiore precisione i parametri che le caratterizzano (velocità, campi di temperatura e pressione ed altri). Questo approccio permette, inoltre, di modificare la geometria del sistema, e di ricalcolare tutte le variabili in esame velocemente ed a costo contenuto: non è necessario allestire un nuovo prototipo, è sufficiente operare all'interno di un applicativo informatico.

Le simulazioni al calcolatore rimangono comunque legate all'esperienza pratica, essendo necessario confrontare periodicamente i risultati numerici con quelli, più grossolani, delle prove di laboratorio. L'obiettivo è di testare il buon funzionamento del codice e così evitare di trovarsi di fronte a risultati senza senso fisico, dovuti o ad errori di impostazione del problema (imputabili all'utente), oppure a problemi interni al software ('buchi', causati dagli autori del programma).

In questo capitolo sarà analizzato il principio di funzionamento degli applicativi di simulazione numerica e della loro procedura di utilizzo.

2.1 Metodi di simulazione numerica

Il lavoro da me svolto si basa su un applicativo commerciale di simulazione numerica, Fluent ©, adatto a risolvere numericamente (metodo dei volumi finiti), anziché analiticamente, le equazioni della fluidodinamica e dell'elettromagnetismo (queste ultime mediante un modulo scritto *ad hoc* dal gruppo di ricerca sui plasmi del DIEM). Il procedimento che tale software segue è quello di suddividere il macrodominio da studiare in sottodomini discreti, in ognuno dei quali saranno poi risolte le equazioni scelte, nella loro forma discretizzata. Tali elementi discreti hanno forma variabile a seconda delle preferenze dell'utente e del numero di dimensioni considerate: triangoli o quadrilateri per geometrie 2D, esaedri, prismi a base triangolare (cunei) o piramidi nel caso di problemi 3D.

Segue un esempio di come si trasforma dalla forma analitica alla sua forma discretizzata una generica equazione di conservazione in stato stazionario di una grandezza scalare ϕ :

$$\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV$$

dove

- ρ = densità;
- \vec{v} = vettore velocità;
- \vec{A} = vettore area della superficie;
- Γ_ϕ = coefficiente di diffusione di ϕ ;
- $\nabla \phi$ = gradiente di ϕ ($= (\partial\phi/\partial x)\hat{i} + (\partial\phi/\partial y)\hat{j}$ in 2D);
- S_ϕ = sorgente di ϕ per unità di volume.

In forma discretizzata la stessa equazione diventa:

$$\sum_f^{N_{facce}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{facce}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_\phi V$$

dove:

- N_{facce} = numero di facce che delimitano la cella;
- ϕ_f = valore di ϕ attraversante la faccia f ;
- $\rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f$ = flusso di massa attraverso la faccia;
- \vec{A}_f = area della faccia f , $|A|$ ($= |A_x \hat{i} + A_y \hat{j}|$ in 2D);
- $(\nabla \phi)_n$ = valore della componente di $\nabla \phi$ normale alla faccia f ;
- v = volume della cella.

Fluent risolve ripetutamente quest'ultima equazione discretizzata in ogni cella in cui è stato suddiviso il dominio di calcolo, ma, per fare questo, come si può notare, occorre il valore di ϕ_f , non conosciuto a priori, ma da ottenersi mediante interpolazione dei valori nei vertici o nei centri degli elementi della griglia. Questi calcoli, approssimati, possono essere effettuati mediante differenti algoritmi, alcuni più veloci e 'stabili', che portano alla soluzione finale più facilmente, altri più lenti ma al contempo più precisi.

Il risultato di questo processo (che necessita di valori iniziali di tentativo per avviare i calcoli) è una serie di correzioni da apportare ai valori di partenza, in maniera da avvicinare questi al valore finale, detto di 'convergenza'. Tali correzioni, a causa della non linearità dei problemi in esame, non sono però applicate integralmente, bensì ridotte di un fattore correttivo (regolabile dall'utente), secondo la seguente formula:

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi$$

dove α è appunto il fattore correttivo regolabile (da questo punto in poi denominato *fattore di sottorilassamento*) e ϕ è la grandezza scalare in esame. Il processo nel complesso è *iterativo*, in quanto deve essere ripetuto in più passaggi successivi per affinare la soluzione del problema. L'algoritmo viene fermato quando le correzioni fra un passaggio (*step*) ed il successivo sono così ridotte da essere trascurabili: i campi di temperatura e di tutte le altre variabili prese in esame non variano più. Per ottenere questo risultato l'utente può manipolare molti parametri del programma, fra i quali i principali sono i fattori α appena mostrati, la selezione delle equazioni da applicare e il metodo di interpolazione utilizzato per ottenere i vari ϕ_f .

Nelle seguenti sezioni saranno prese in esame i vari casi studiati e la strategia utilizzata per condurre a convergenza ogni specifico problema.

2.2 Impostazione del problema numerico

Obiettivo della simulazione è analizzare come il getto di plasma in uscita da una torcia Cebora CP160 varia al variare della pressione di alimentazione. A tal proposito sono state prese in considerazione le seguenti condizioni di funzionamento a regime (nessuna simulazione dipendente dal tempo è stata presa in esame):

1. caso di torcia spenta (il getto è solo aria, non si ha del plasma);

2. caso di arco pilota (presenza di un arco fra catodo ed ugello, cioè in modalità non trasferita);
3. caso di arco trasferito fra catodo e ‘anodo virtuale’.

La modalità con ‘anodo virtuale’ consiste nell’ipotizzare appena al di fuori del dominio la presenza di un pezzo di metallo, non analizzato computazionalmente nella simulazione, che raccolga la scarica, così da semplificare geometria e condizioni al contorno (descritte meglio nei successivi paragrafi), e velocizzare i calcoli. Come è facile immaginare, questo porta ad una approssimazione dei risultati, soprattutto allorché vi siano, nella realtà, strette interazioni fra getto di plasma e pezzo da trattare o tagliare.

Tutte le simulazioni sono state svolte nell’ambito di modelli a due dimensioni, sulla base di una ipotizzata perfetta assialsimmetria del sistema, funzionale a produrre risultati preliminari ad uso di successive simulazioni tridimensionali. Il concetto è di partire con le simulazioni più semplici da portare a termine, aggiungendo mano a mano complessità per incrementare l’accuratezza dei risultati.

L’utilizzo di un software di simulazione numerica quale Fluent prevede l’esecuzione di passaggi obbligatori in serie vincolata:

1. allestimento di una rappresentazione della geometria da analizzare, mediante un software di CAD, nel caso specifico *Gambit*, prodotto dalla stessa casa di Fluent;
2. discretizzazione di tale dominio in elementi finiti (creazione della griglia o “mesh”), passaggio svolto sempre con l’applicativo *Gambit*;
3. importazione della *mesh* in Fluent (che si occupa esclusivamente della risoluzione delle equazioni) e imposizione delle condizioni al contorno, cioè dei parametri fissi imposti dall’utente sui confini della geometria. Due esempi: pressione in ingresso nella zona di immissione del gas e corrente imposta sulla punta dell’elettrodo;
4. esecuzione della simulazione e costante monitoraggio dei risultati ottenuti, con massima attenzione durante le prime iterazioni, gradualmente ridotta in vicinanza della convergenza;
5. passaggio dei dati così ottenuti in un software di rielaborazione, per ottenere risultati in forma chiara e presentabile.

L'attività da me svolta si incentra sulle fasi di scelta ed imposizione delle condizioni al contorno e sulla successiva attività di simulazione al calcolatore, usando come base di partenza griglie già precedentemente allestite dal gruppo di ricerca del DIEM.

Nel prossimo capitolo sarà analizzata ogni configurazione studiata, illustrando le procedure seguite al momento della simulazione ed i risultati ottenuti.

Capitolo 3

Analisi dei risultati

3.1 Simulazione a freddo

3.1.1 Impostazione del problema

La griglia utilizzata per questa simulazione è illustrata in figura 3.1, mentre le condizioni al contorno imposte sono le seguenti:

- **ingresso della torcia**, (a): a monte di questa zona sono collocati i condotti attraverso i quali il gas penetra all'interno della torcia. Si è deciso di imporre un valore di pressione in questo confine – e non una portata massica – per via della maggior precisione delle misure della prima, effettuate in laboratorio; si è imposta la direzione del gas entrante inclinata a 45° rispetto al piano della griglia, come risultava da simulazioni tridimensionali preliminari, così da imporre al gas un moto di rotazione attorno all'asse della torcia;
- **pareti della camera di scarico**, (e) ed (f): su queste due pareti, in tutte le simulazioni, è stata imposta una pressione pari a quella atmosferica, mentre la temperatura di un eventuale fluido che dovesse rientrare a causa di vortici è stata fissata a 300 K (temperatura ambiente);
- **temperature delle pareti di catodo, ugello ed anodo**, (b), (c), (d) e (g): sono state impostate a 300 K, in quanto, quando la torcia è spenta, non vi sono sorgenti di energia che possano far variare la temperatura dei componenti della torcia;
- **risolutore**: per queste simulazioni è stato scelto il risolutore segregato

(risolve ogni equazione separatamente), con l'ipotesi aggiuntiva di assialsimmetria. L'asse è stato individuato nella linea (h) mostrata in figura 3.1;

- **gas di lavoro:** ogni gas ha proprietà fisiche differenti, le quali si riflettono sui risultati; la torcia Cebora CP160 funziona in aria e quindi tale è stata la scelta del fluido circolante;
- **modello viscoso:** tale scelta influisce sul moto del gas e sulla sua energia, in quanto considerare il moto laminare o turbolento porta a differenti dissipazioni. Inizialmente si è supposto un moto puramente laminare – realistico per bassi valori della pressione in ingresso –, per poi passare all'inclusione dei fenomeni turbolenti mediante il modello “k- ϵ ”, per pressioni superiori a 70 kPa;
- **parametri elettrici:** questi non sono stati inseriti nella simulazione in quanto l'alimentazione elettrica era del tutto assente.

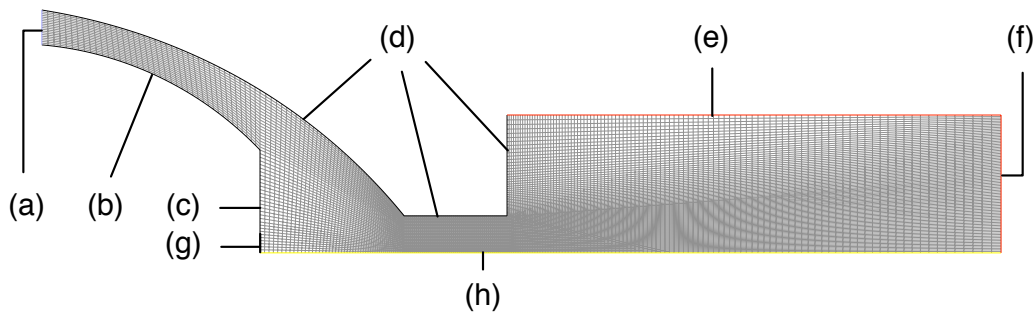


Figura 3.1: Griglia utilizzata per la simulazione a freddo della torcia CP160, dove (a) è la zona di entrata del gas, (b) la parete dell'elettrodo, (c) la punta dell'elettrodo, con la parte più centrale (g) costituita dall'inserito di afnio, (d) sono le pareti dell'elettrodo, (e) e (f) sono le zone di uscita del plasma, (h) l'asse di assialsimmetria.

3.1.2 Risultati

Il valore di pressione iniziale all'ingresso della torcia è stato imposto a 30 kPa (valori sempre riferiti alla pressione atmosferica, salvo diversamente indicato), sufficientemente basso da non indurre problemi di convergenza. Inizialmente

non si sono riscontrate difficoltà nell'esecuzione della simulazione, per cui, appena si raggiungeva una situazione stabile (i residui diminuivano poco fra una iterazione e la successiva), la pressione veniva aumentata di 10 kPa. Di pari passo, però, sono aumentate le difficoltà di convergenza, cosicché i parametri di sottorilassamento dovevano essere man mano diminuiti per non incorrere nella divergenza (definita come situazione in cui i valori delle variabili in ogni cella non si affinano, di iterazione in iterazione, sempre più, bensì si distanziano dal risultato).

Alla pressione di 70 kPa questi fattori sono risultati decisamente bassi; il fattore correttivo per la pressione più degli altri: esso era pari a 0,05, tale cioè da obbligare Fluent a ridurre di venti volte le correzioni calcolate dal suo algoritmo risolutivo.

Analizzando la figura 3.2 si può, poi, notare un fatto interessante: il canale centrale del getto di gas possiede una velocità significativamente inferiore a quella della zona circostante, con direzione in certe zone addirittura diretta verso l'interno della torcia (vedi figura 3.3). Ciò suggerisce la presenza di fenomeni turbolenti, di fatto non riscontrati nei risultati forniti da Fluent, mostrando bene come il modello laminare, per un getto di gas freddo in una geometria come quella della CP160, sia in parte insoddisfacente.

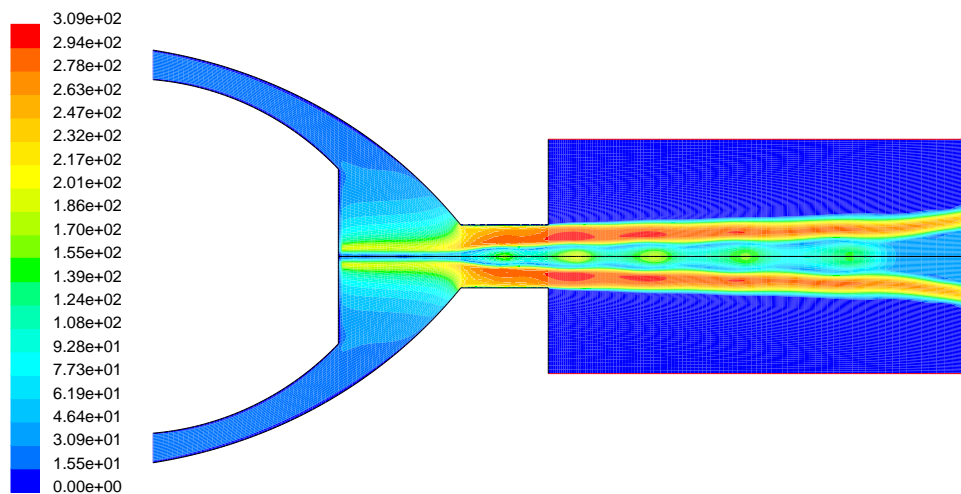


Figura 3.2: Profilo di velocità in m/s nel dominio con pressione in ingresso imposta di 70 kPa.

Analizzata la situazione, si è deciso di cambiare il modello viscoso, passando da laminare a turbolento.

I moti turbolenti sono caratterizzati da fluttuazioni della velocità delle

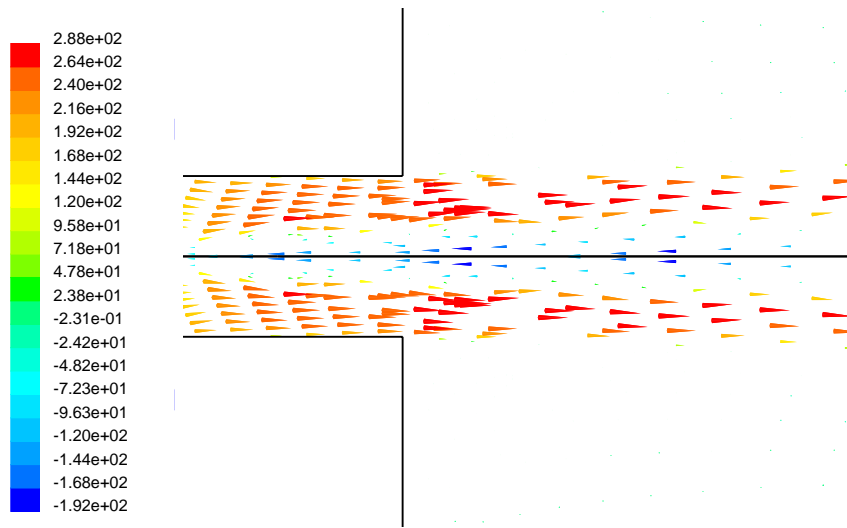


Figura 3.3: Vettori di velocità nella zona di espansione passato l'ugello, colorati in base al valore della velocità assiale in m/s, quando in ingresso $p=70$ kPa.

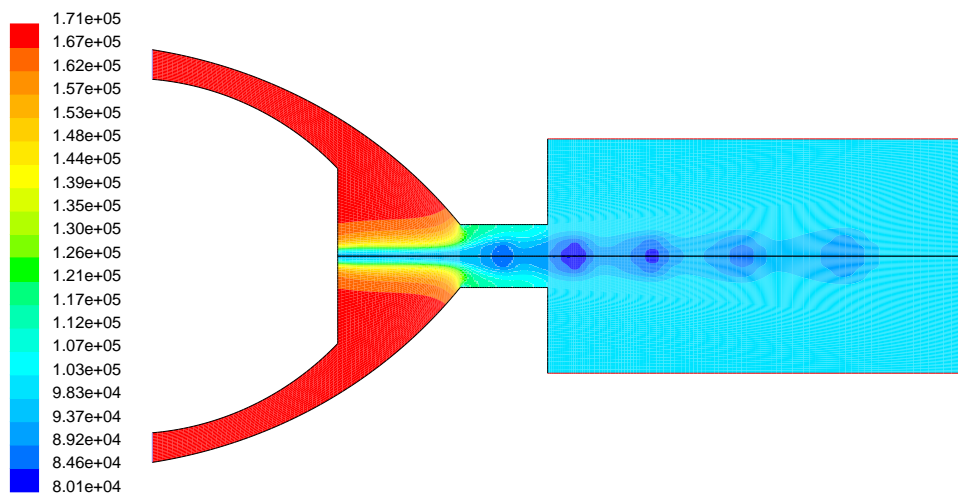


Figura 3.4: Profilo di pressione assoluta in Pa nel dominio quando in ingresso $p=70$ kPa.

singole particelle, tali da comportare anche variazioni dell'energia. Risolvere analiticamente le equazioni di Navier-Stokes, così da conoscere con precisione l'esatto comportamento del fluido, è, per geometrie non banali, impossibile, per cui la loro discretizzazione è indispensabile. La loro successiva risoluzione numerica è affrontabile a differenti livelli di affinamento, a seconda della precisione dei risultati che si intende raggiungere.

Il metodo più preciso fra quelli di interesse pratico è il "DNS" (*Direct Numerical Simulation*), che consiste nell'applicare, ad ogni elemento della griglia discreta, le equazioni di Navier-Stokes discretizzate ma non approssimate mediante alcun modello. Questo metodo, se ha il pregio di permettere l'analisi di ogni singolo moto nel fluido, ha tuttavia il grosso difetto di richiedere griglie di calcolo assai fitte (ogni elemento non deve superare le dimensioni dei vortici), il che comporta un consistente aumento dei tempi di calcolo, tale da rendere spesso il problema inaffrontabile.

Un metodo che rinuncia alla conoscenza completa del sistema, con l'obiettivo di ridurre i tempi di calcolo, è il "LES" (*Large Eddy Simulation*). Questo procede approssimando, mediante l'utilizzo di modelli, i moti non stazionari del fluido al di sotto di una determinata scala di dimensioni (tipicamente definita dalla dimensione delle celle del dominio), mentre li continua a risolvere esattamente se le loro dimensioni superano tale scala. Questo metodo è una sorta di compromesso fra il precedente (*DNS*) ed il successivo (*RANS*).

Il metodo che riduce più di tutti lo sforzo computazionale richiesto per la conoscenza del comportamento del fluido è il "RANS" (*Reynold Averaged Navier-Stokes*). Il principio su cui si basa è quello di approssimare (su scala spaziale o temporale) qualunque fenomeno turbolento, indipendentemente dalla sua scala di dimensioni. Il risultato è una serie di equazioni alle derivate parziali, nelle quali compaiono variabili aggiuntive e differenti in base al modello di approssimazione scelto.

Per la presente simulazione è stato scelto quest'ultimo approccio, con il modello di approssimazione "k- ϵ ", caratterizzato da buona stabilità numerica, accuratezza e semplicità di risoluzione, che lo rendono uno dei modelli preferiti per le simulazioni ingegneristiche; la variante RNG, che ne migliora il comportamento, inserendo il supporto per fluidi con swirl e fondandosi su basi maggiormente teoriche rispetto a quelle pressoché empiriche della variante base, è la scelta prediletta.

Una volta reimpostato Fluent secondo le direttive sopraindicate, si è proseguito con le simulazioni a partire da 70 kPa di pressione imposta, utilizzando come soluzione di tentativo iniziale i dati precedentemente ottenuti col modello laminare, così da accelerare la convergenza. La pressione è stata aumentata ogni qualvolta ci si approssimava alla convergenza, fino a raggiungere il valore

massimo di 105 kPa, corrispondenti al valore misurato in laboratorio su una vera torcia CP160 spenta. Il risultato ottenuto è visibile nelle figure 3.5 e 3.6.

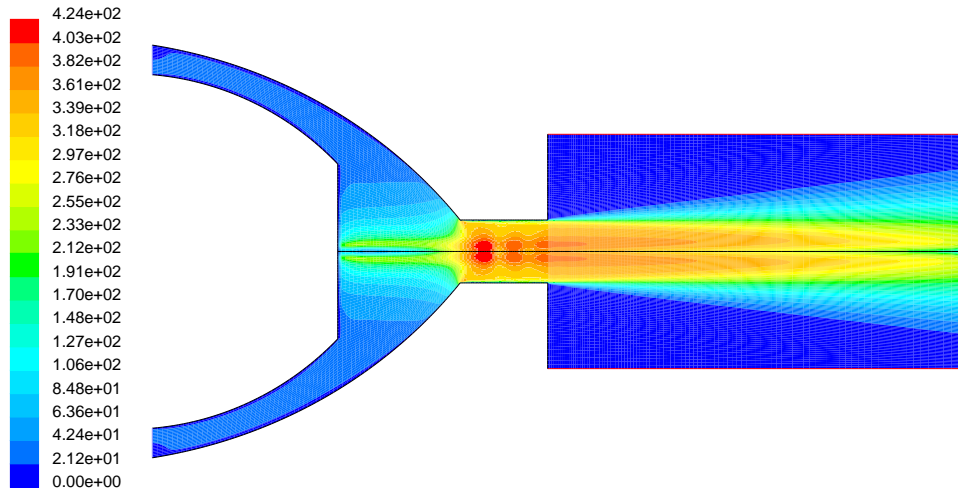


Figura 3.5: Profilo di velocità in m/s con pressione in ingresso imposta di 105 kPa.

Il modello “k- ϵ ” si è mostrato quindi in grado di produrre risultati più realistici rispetto al modello laminare e di evidenziare come la turbolenza nella torcia CP160 a freddo sia effettivamente un elemento non trascurabile. Essa si manifesta sin dalla zona del catodo, aumentando poi in corrispondenza dell’ugello, divenendo molto importante nel confine fra getto di gas ad alta velocità ed aria circostante, per arrivare infine ad interessare l’intero getto ad una distanza di circa 12 mm dall’uscita dell’ugello. Le fonti di turbolenza nel modello analizzato si possono individuare in quattro fattori: l’incontro di fronte al catodo del flusso di gas con moto di swirl assai elevato (vedi figura 3.10), la presenza di angoli vivi non raccordati tra camera del plasma e condotto dell’ugello, la presenza di angoli vivi in uscita dell’ugello ed infine la presenza di una interfaccia fra un getto ad alta velocità e una zona di gas fermo. Le figure 3.7 e 3.8 mostrano chiaramente questo fenomeno, importante soprattutto in corrispondenza dell’uscita dell’ugello.

Il modello “k- ϵ ”, nonostante porti a miglioramenti rispetto al caso laminare, abbinato ad una simulazione bidimensionale, non è ancora sufficiente per far combaciare i dati delle misurazioni di laboratorio con quelli calcolati: a fronte di un valore di portata massica calcolato di $10,17 \cdot 10^{-4}$ kg/s, in laboratorio si è riscontrata una portata di 22 l/min, corrispondente quindi a $4,29 \cdot 10^{-4}$ kg/s (caso di aria secca). Questa discrepanza fra la portata reale e

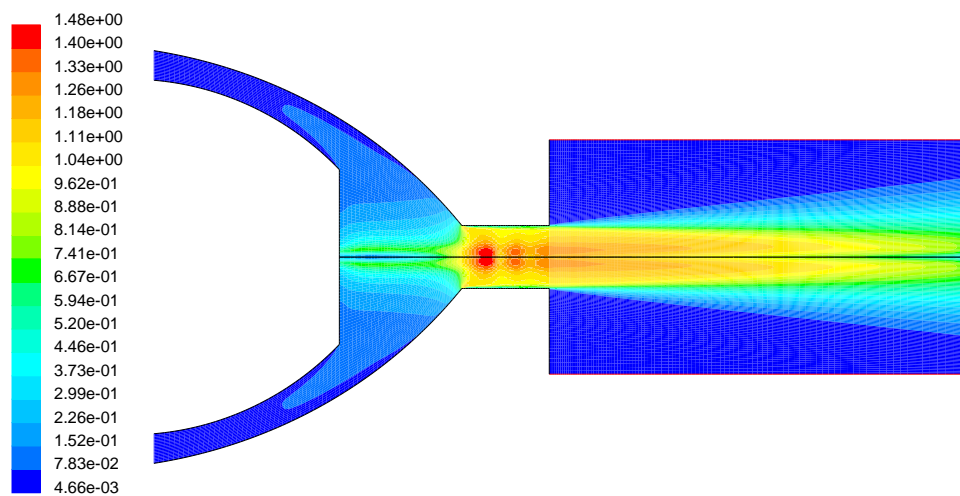


Figura 3.6: Profilo di velocità espressa come numero di Mach con pressione in ingresso imposta di 105 kPa.

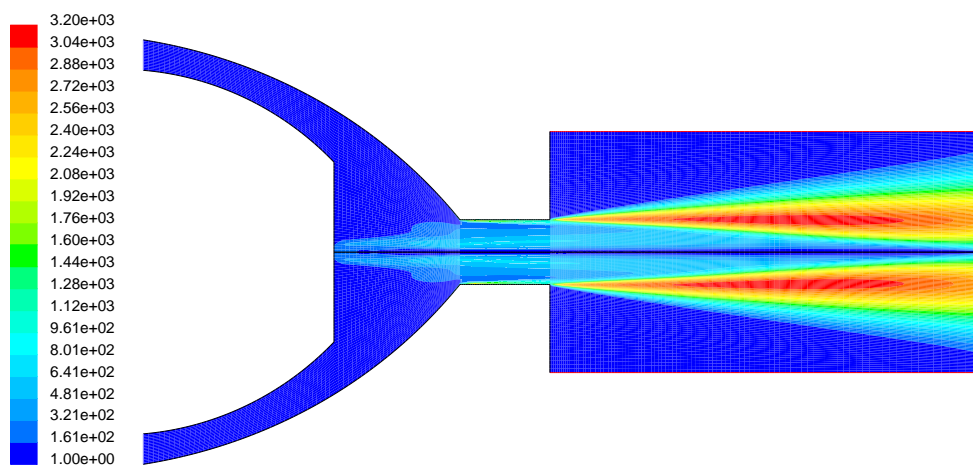


Figura 3.7: Profilo della variabile k (energia cinetica turbolenta) in m^2/s^2 quando in ingresso $p=105$ kPa.

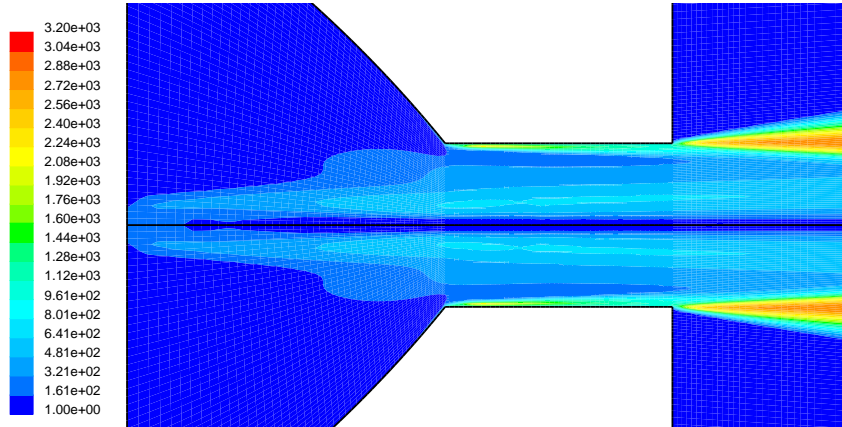


Figura 3.8: Particolare della figura 3.7.

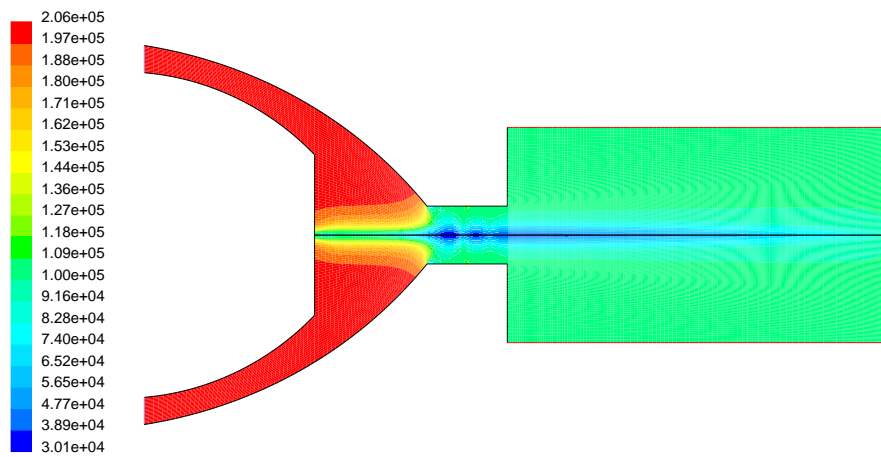


Figura 3.9: Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso $p=105$ kPa.

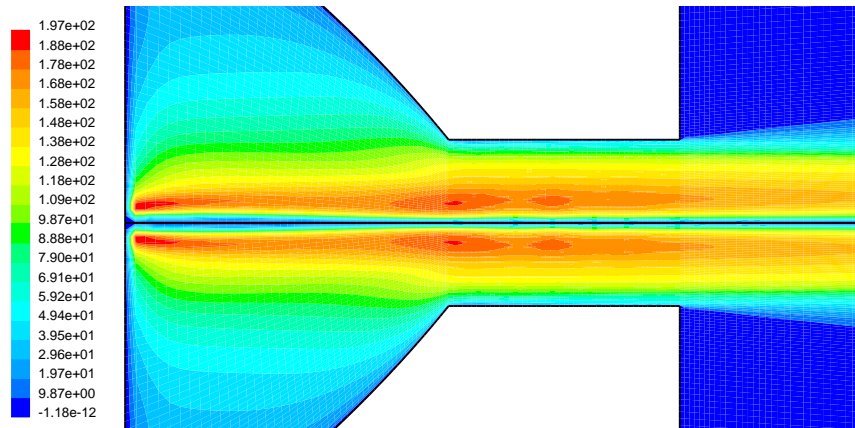


Figura 3.10: Profilo della velocità di swirl in m/s nel dominio quando in ingresso $p=105$ kPa, particolare.

quella prevista – più che doppia – è causata dai seguenti due errori di idealizzazione (errori, cioè, dovuti ad approssimazioni della realtà introdotti nel passaggio dal modello matematico al modello numerico):

- ipotesi di una immissione *laminare ed assialsimmetrica* di gas nella torcia (zona (a) di figura 3.1): nella torcia reale il gas penetra, a monte della zona rappresentata nella griglia, attraverso tre condotti di piccola sezione, posti in posizione tangenziale per ottenere un moto di *swirl*, e non attraverso una corona circolare uniforme, come impostato in Fluent. In questi condotti, caratterizzati da spigoli vivi e da impatti del gas sulla superficie interna della torcia, si creano fenomeni turbolenti che si propagano lungo l'intero condotto fino all'ugello;
- ipotesi di superfici *perfettamente lisce* (rugosità nulla), non in grado di creare turbolenza: ciò è assai distante dalla realtà, in quanto la lavorazione al tornio di ugello ed elettrodo lascia solchi non rifiniti, in certe zone visibili anche ad occhio nudo.

Una simulazione più realistica, che prenda in considerazione anche i parametri di rugosità e l'intera geometria tridimensionale della torcia, è quindi indispensabile per ottenere al calcolatore un modello che fornisca dati in accordo con le misure di laboratorio.

3.2 Simulazione con arco non trasferito

3.2.1 Impostazione del problema

Per le simulazioni a caldo è stata ampliata, lungo la direzione perpendicolare all'asse nella zona oltre l'ugello, l'estensione del dominio di calcolo, così da simulare meglio l'attacco dell'arco ed il comportamento del plasma all'esterno della torcia. La griglia utilizzata è mostrata in figura 3.11.

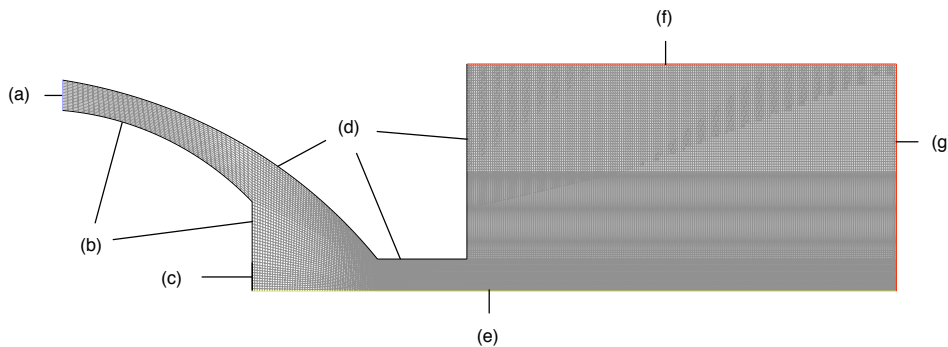


Figura 3.11: Griglia utilizzata per la simulazione a caldo della torcia CP160, dove (a) è la zona di entrata del gas, (b) la parete frontale dell'elettrodo, (c) l'inserto di afnio, (d) le pareti dell'elettrodo, (e) l'asse di assialsimmetria, (f) e (g) le zone di uscita del gas.

Per le simulazioni con arco acceso si è reso necessario integrare in Fluent un modulo aggiuntivo, scritto *ad hoc*, in grado di istruire il risolutore numerico sugli effetti dei campi elettromagnetici presenti (valori di energia dissipata per effetto Joule) e sulle perdite di energia per irraggiamento. Con tale modulo si forniscono a Fluent anche i valori delle costanti termodinamiche dell'aria fino a 30.000 K, pubblicate in [5], ed il valore di corrente circolante nella torcia. Tale modulo utilizza le seguenti approssimazioni:

- *plasma otticamente sottile*: si suppone che ogni elemento di plasma emetta radiazione elettromagnetica in funzione della temperatura raggiunta, trascurando l'assorbimento di questa radiazione da parte del plasma rimanente. L'approssimazione è accettabile quando l'energia che ogni elemento di plasma riceve per via radiativa è trascurabile rispetto a quella assorbita per effetto Joule. I casi studiati soddisfano questo requisito;

- *equilibrio termodinamico locale*: si suppone che la ‘temperatura’ degli elettroni sia pari a quella degli ioni presenti nel plasma, situazione verificata in quei plasmi in cui eccitazione e ionizzazione siano dovute a fenomeni collisionali. Nei plasmi termici questa approssimazione è valida nella regione centrale del plasma, mentre non è rispettata entro una “lunghezza di Debye” dalla superficie degli elettrodi (10^{-4} – 10^{-3} cm, cfr. [6]).

Le condizioni al contorno imposte sono state le seguenti:

- **ingresso della torcia**: imposto il valore della pressione, con inclinazione del gas entrante di 45° rispetto al piano della simulazione, in modo da avere un moto di swirl;
- **pareti del catodo**: all’interno del catodo passa l’aria che poi entrerà nella torcia, per cui è stata fissata una temperatura di 300 K, pari a quella del refrigerante. Alle pareti del catodo è stato assegnato un valore nullo del flusso del campo elettrico (corrente nulla);
- **punta d’afnio**: sulla punta d’afnio è stato fissato, mediante il modulo aggiuntivo integrato in Fluent, un profilo di corrente parabolico, tale da portare ad un valore integrale di 134 A. Poiché tale valore è prestabilito, l’emissione termoionica è ignorata e l’imposizione di una temperatura di 3.000 K sull’afnio non è stata rilevante ai fini della simulazione;
- **pareti dell’ugello**: le pareti dell’ugello sono refrigerate da un flusso esterno di aria (non incluso nella simulazione), per cui la loro temperatura è costante e di 300 K. Poiché nella situazione di arco pilota (arco non trasferito) la scarica si ha tra afnio ed ugello, il valore del potenziale su quest’ultimo è sempre pari a zero;
- **pareti esterne del dominio** nella zona di scarico: oltre all’imposizione di una temperatura di 300 K per il gas rientrante, il valore della corrente che le attraversa è fissato a zero;
- **risolutore**: come per il caso a freddo, si è usato il risolutore segregato 2D con il supporto per i moti di swirl del gas;
- **modello viscoso**: si è scelto di utilizzare un modello laminare a causa del ridotto valore della viscosità dell’aria in corrispondenza di alte temperature, quali quelle raggiunte dal getto di plasma in una torcia ad arco.

3.2.2 Risultati

Per agevolare lo sviluppo del getto ed evitare la divergenza nelle prime iterazioni, si è trovato essere utile avere un gas caratterizzato da ridotta viscosità e da velocità assiale iniziale non nulla. Il primo vincolo si è ottenuto impostando la temperatura ovunque a 14.000 K – la viscosità dell’aria cala drasticamente passando da 10.000 K a 14.000 K, vedi figura 3.12 –; per quanto concerne il secondo, i risultati migliori si sono ottenuti per una velocità di 100 m/s (il medesimo valore delle precedenti simulazioni a freddo). Questi due accorgimenti, pur risultando utili, non si sono dimostrati sufficienti a permettere il completo sviluppo del getto di plasma lungo l’intera lunghezza della torcia: il campo di temperatura nel dominio veniva corretto più velocemente del campo di velocità, con la conseguenza di vedere ridotta la temperatura a meno di 10.000 K nella zona di ugello prima che il getto si fosse sviluppato. Conseguentemente, a causa dell’aumento della viscosità dell’aria al ridursi della temperatura, si formava una zona molto viscosa (un ‘tappo’) che impediva l’ulteriore proseguimento della simulazione (bloccava il getto).

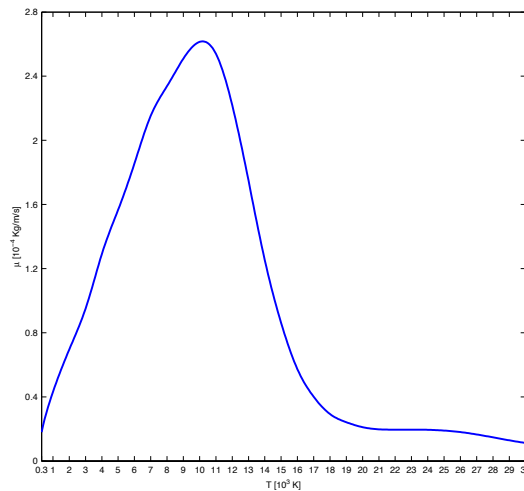


Figura 3.12: Viscosità dell’aria in funzione della temperatura.

Dopo aver variato i parametri di sottorilassamento più volte, con l’obiettivo di rallentare l’aggiornamento del campo di temperatura e, quindi, aggirare il problema, si è riscontrata l’utilità di disabilitare totalmente la risoluzione delle equazioni dell’energia e dell’elettromagnetismo, per riattivarle quando l’intero getto non si fosse perfettamente sviluppato (raggiungimento della convergenza delle sole equazioni della fluidodinamica).

Le pressioni alle quali sono state condotte le simulazioni con arco non

trasferito sono le seguenti: 15 kPa, 30 kPa, 50 kPa, 70 kPa, 80 kPa, 110 kPa, 150 kPa. Alla pressione di 150 kPa la convergenza è risultata difficile da raggiungere a causa dei gradienti elevati di pressione in uscita dall'ugello in corrispondenza dei nodi di Mach (onde di shock). Dopo l'analisi dei dati raccolti, si è, perciò, deciso di non proseguire oltre, essendosi dimostrato anche il modello "k- ϵ " problematico per il raggiungimento della convergenza.

Analizzando il profilo di velocità al variare della pressione (figure 3.13, 3.14, 3.15), si nota come il getto diventi sonico ad una pressione di 70 kPa, in corrispondenza della quale si formano dei nodi di Mach. Il loro numero aumenta all'aumentare della pressione, con parallela espansione del diametro del getto in uscita dall'ugello.

I nodi di Mach si manifestano come oscillazioni, al procedere lungo l'asse della torcia, del valore di pressione e, sempre lungo l'asse ed in corrispondenza delle prime, della velocità del getto. La figura 3.18 mostra il picco di velocità in corrispondenza della zona d'uscita dall'ugello, superata la quale, superati i nodi di Mach, la velocità decresce gradualmente (se ne può osservare il profilo sull'intero dominio nelle figure 3.17, 3.19 e 3.21).

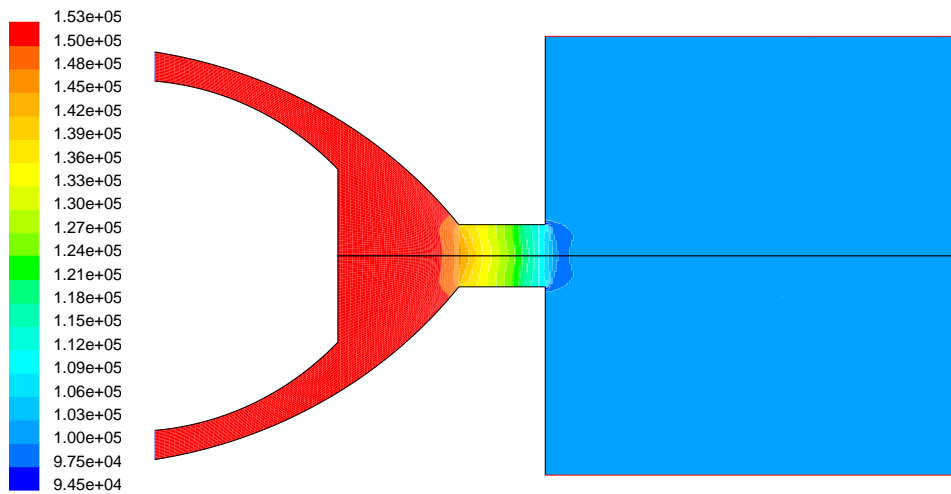


Figura 3.13: Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso $p=50$ kPa.

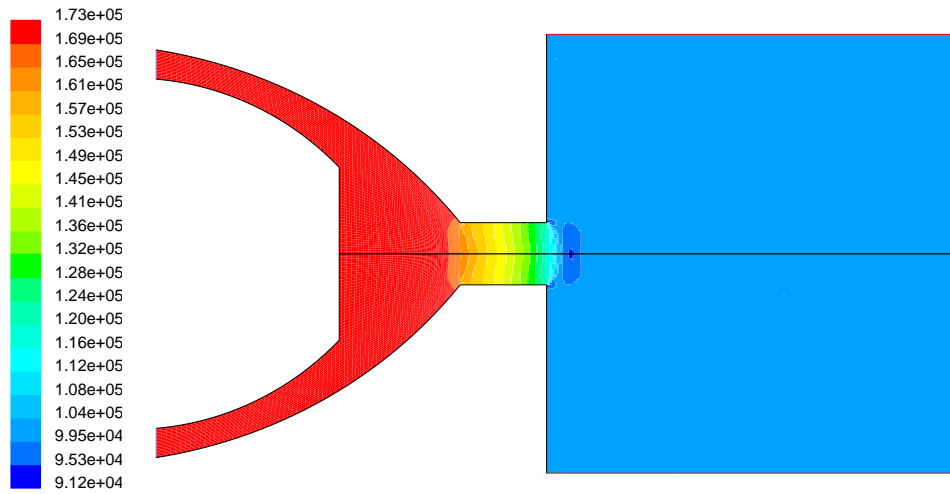


Figura 3.14: Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso $p=70$ kPa.

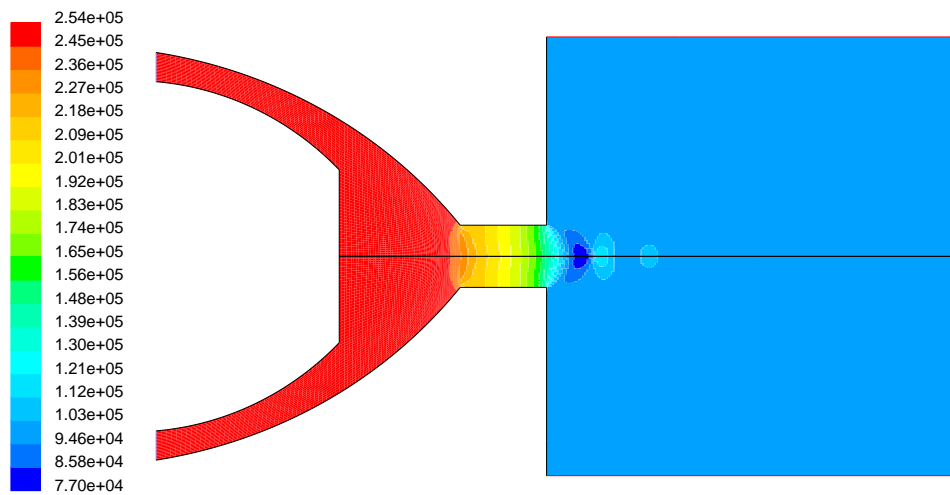


Figura 3.15: Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso $p=150$ kPa.

Analizzando i profili di temperatura e corrente delle figure 3.22–3.31, è possibile notare variazioni sostanziali della forma della scarica e del campo di temperatura al variare della pressione in ingresso. Le figure 3.22, 3.24, 3.26, 3.28 e 3.30 mostrano il punto di attacco risentire notevolmente delle condizioni al contorno e passare da una situazione in cui l’attacco sull’ugello è interno (zona del condotto cilindrico), ad una in cui è sulla faccia esterna dell’ugello, con un arco di lunghezza notevole, tale da coprire un’area cospicua al di fuori dell’ugello stesso.

Il campo di temperatura varia di conseguenza, registrando i valori massimi in corrispondenza dei massimi valori di densità di corrente, nella zona d’ingresso del condotto (in figura 3.32 è riportato un esempio). In tale zona, infatti, si risente dell’accoppiamento tra plasma e campo magnetico, che porta il primo ad essere ‘costretto’ dal secondo: la situazione di equilibrio, riportata in figura 3.33, è quella in cui le forze del campo magnetico, che tendono a ridurre il diametro della scarica, sono compensate dall’espansione del gas. La figura evidenzia anche che il campo magnetico è nullo nelle zone lontane dal getto di plasma, mentre raggiunge il valore massimo (colore verde-azzurro) negli angoli di uscita dell’ugello, in corrispondenza dei quali il campo prodotto dalla corrente lungo l’asse si somma a quello prodotto dalla corrente che si riattacca esternamente. Nella camera del plasma (in cui la corrente segue l’andamento mostrato in figura 3.32), il campo magnetico diventa progressivamente più forte all’aumentare della distanza dall’asse, raggiunge il massimo di intensità in corrispondenza del confine del getto di plasma, dopodiché cala progressivamente e si annulla nei condotti di iniezione del gas.

La temperatura massima del plasma aumenta all’aumentare della pressione, presumibilmente a causa dell’aumento di densità del gas. In virtù di questo aumento gli elettroni interagiscono maggiormente con gli atomi del mezzo e cedono una parte maggiore della loro energia sotto forma di calore.

Nell’analizzare i profili di corrente nel dominio studiato è importante ricordare che la simulazione effettuata prevede una ipotesi di assialsimmetria totale del sistema, nella realtà non soddisfatta. La semplificazione adottata porta a soluzioni delle equazioni nella realtà assai difficili o impossibili da riscontrare: la presenza di una corrente lungo l’intero perimetro dell’ugello sarebbe una situazione, qualora mai possibile, assai instabile. Ogni perturbazione introdotta genererà infatti una differenza nell’intensità delle forze di Lorentz generate dal plasma, così da portare il sistema, dallo stato mostrato dalle simulazioni, in una configurazione in cui la scarica è a canale singolo ed il punto di attacco puntiforme, anziché sviluppato sull’intera circonferenza dell’ugello. Le simulazioni qui trattate sono comunque utili in quanto, a causa dei fenomeni fluidodinamici (moto di *swirl*, turbolenza), è sensato pensare che la scarica

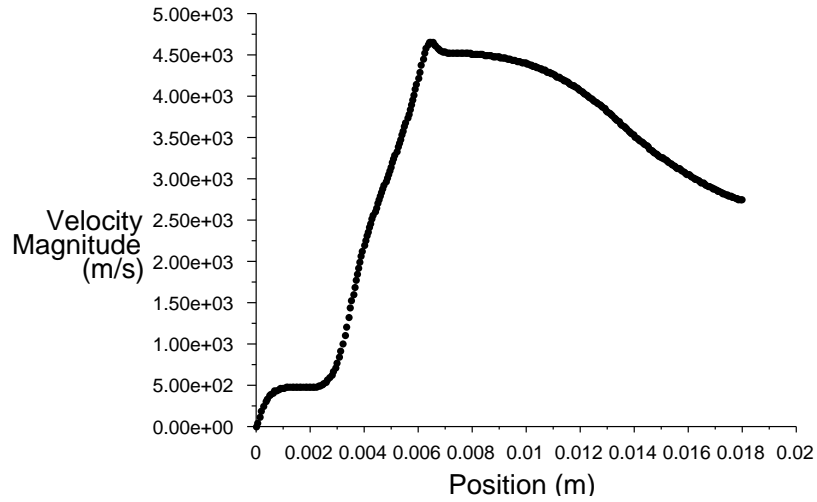


Figura 3.16: Profilo di velocità lungo l'asse della torcia per $p=50$ kPa.

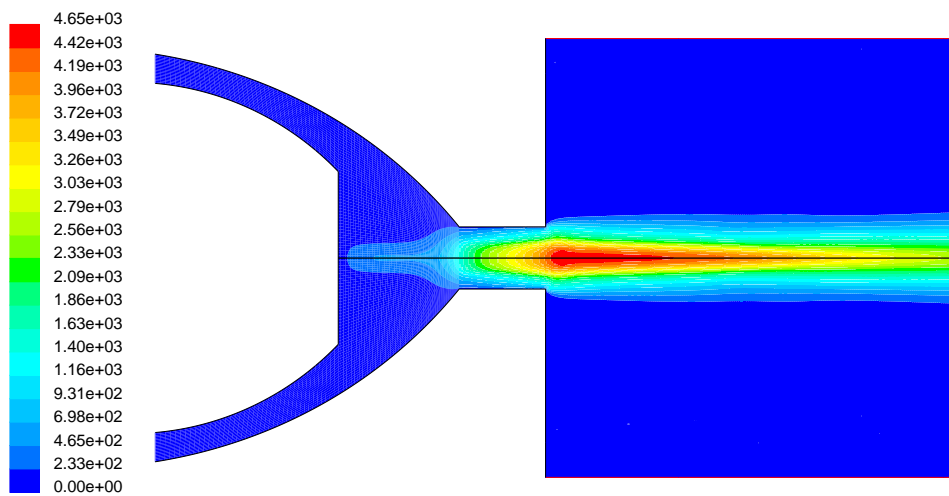


Figura 3.17: Profilo di velocità in m/s quando in ingresso $p=50$ kPa.

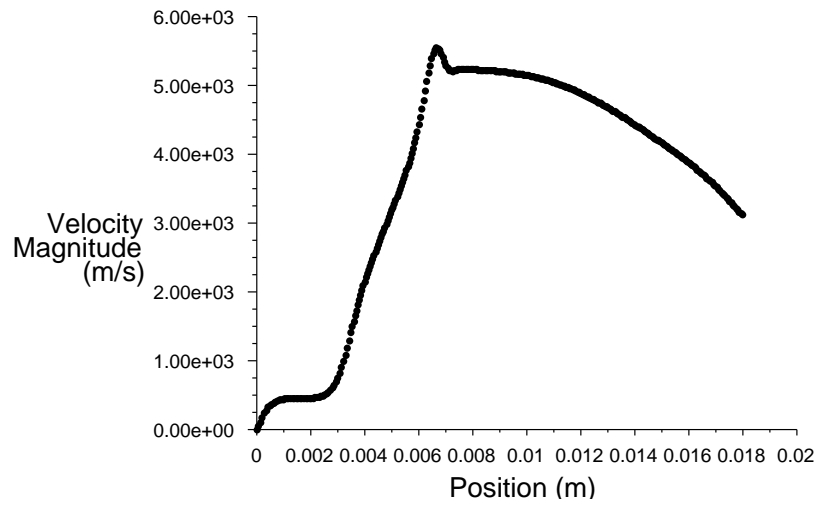


Figura 3.18: Profilo di velocità lungo l'asse della torcia per $p=70$ kPa.

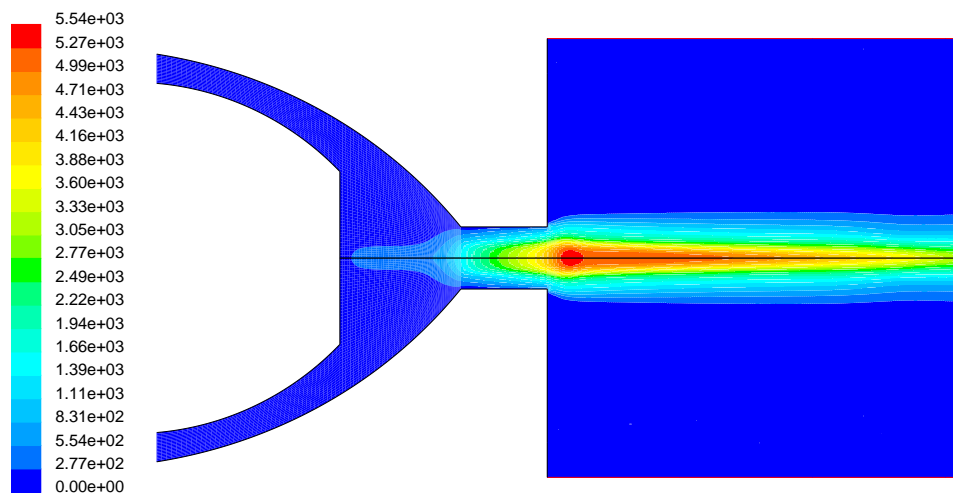


Figura 3.19: Profilo di velocità in m/s quando in ingresso $p=70$ kPa.

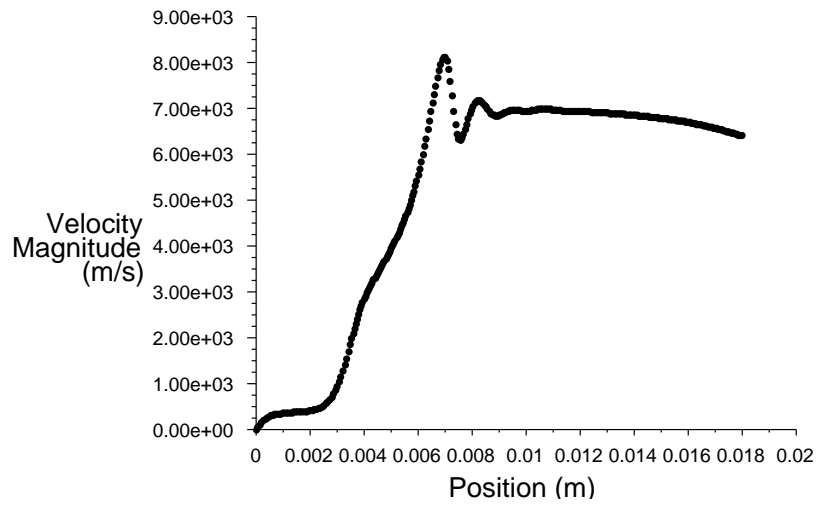


Figura 3.20: Profilo di velocità lungo l'asse della torcia per $p=150$ kPa.

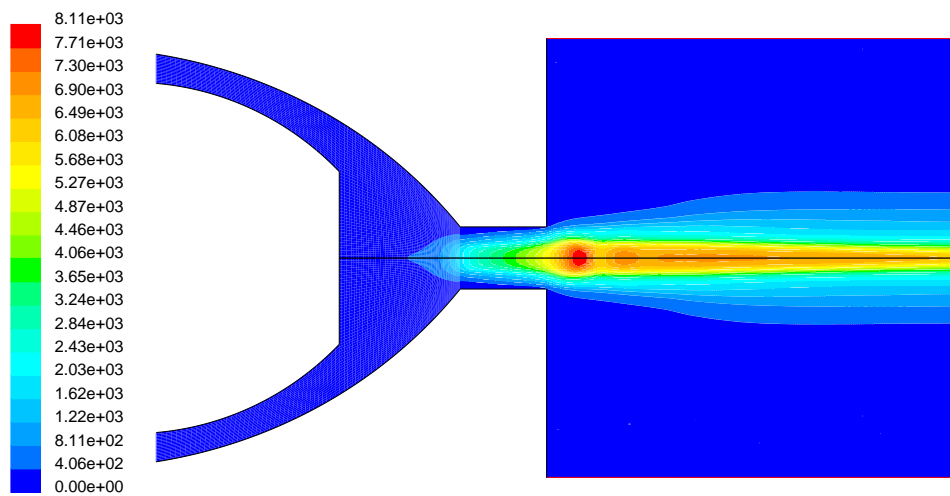


Figura 3.21: Profilo di velocità in m/s quando in ingresso $p=150$ kPa.

reale ruoti attorno al perimetro dell'ugello; ipotesi confermata da una usura uniforme degli ugelli attorno alla bocca di uscita. Ne risultano campi di temperatura simili a quelli ottenuti con la presente simulazione bidimensionale, che si configura, di conseguenza, come 'media' temporale di un fenomeno periodico tridimensionale. L'unico metodo in grado di verificare la validità della presente conclusione consiste nel condurre simulazioni tridimensionali dipendenti dal tempo, delle quali si tratterà nel capitolo 4.

L'aumento di temperatura del plasma all'aumentare della pressione ha un effetto diretto sulla conducibilità del plasma (come spiegato nel capitolo 1): come si può osservare nelle figure 3.34, 3.35 e 3.36, i canali conduttivi più ampi e profondi si riscontrano in corrispondenza delle pressioni (e temperature) maggiori. Questo fattore può risultare importante al momento del trasferimento dell'arco, fornendo a questo un canale privilegiato lungo il quale incanalarsi durante il transitorio arco pilota-arco trasferito. La conoscenza precisa di questo transitorio richiederebbe ancora simulazioni tridimensionali dipendenti dal tempo, non contemplate dal presente lavoro.

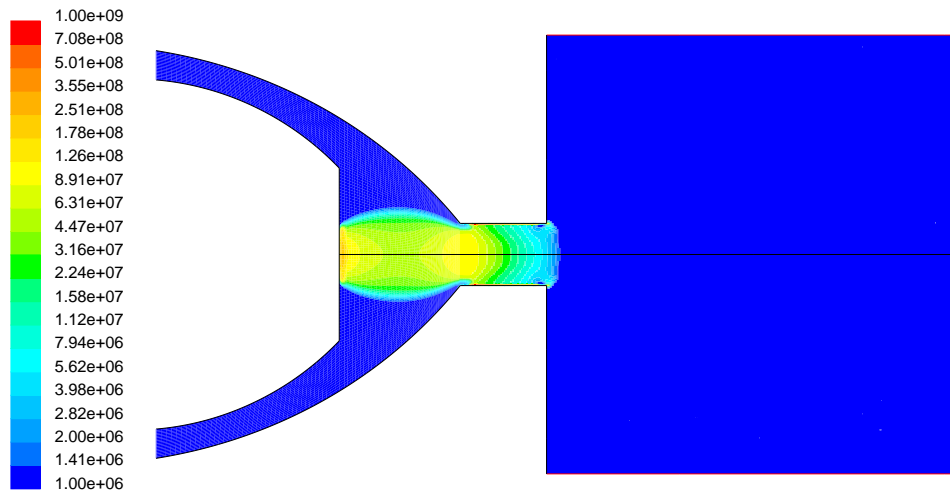


Figura 3.22: Profilo di densità di corrente in A/m^2 quando in ingresso $p=15$ kPa. La scala è stata uniformata a quella delle figure 3.24, 3.26, 3.28 e 3.30 per una più agevole confrontabilità dei risultati.

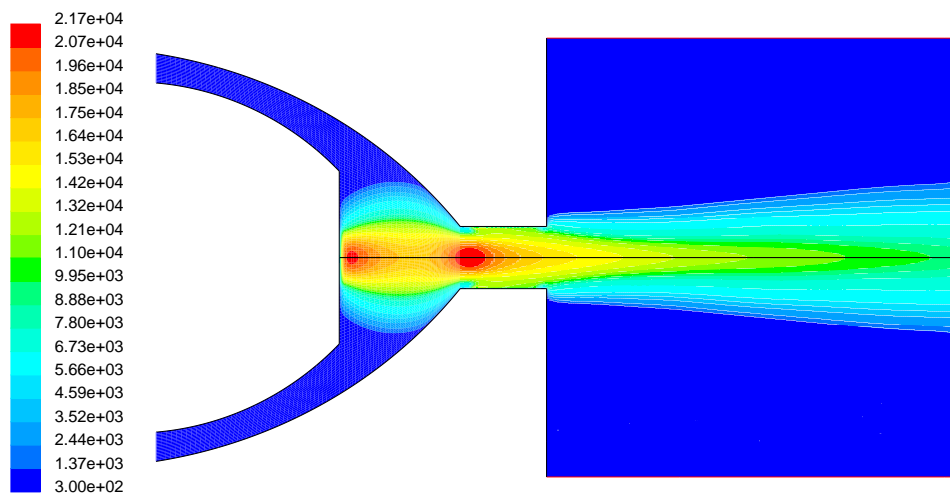


Figura 3.23: Profilo di temperatura in K quando in ingresso $p=15$ kPa.

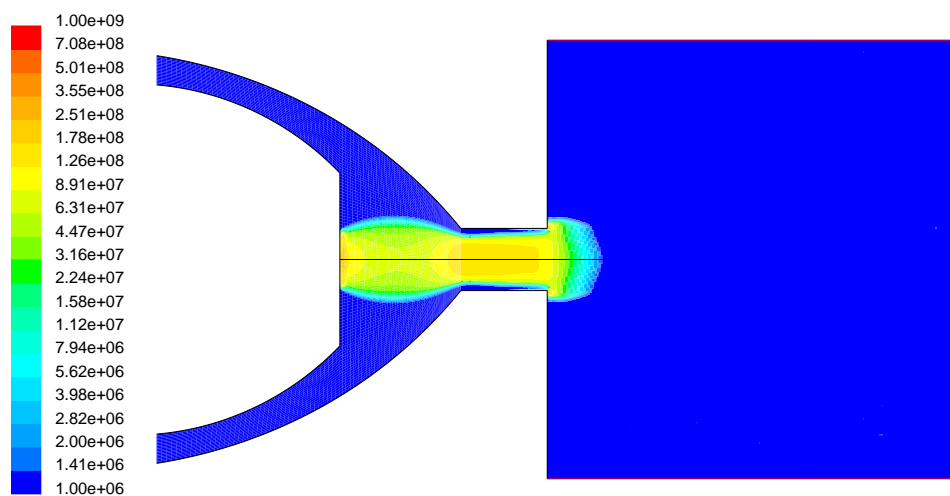


Figura 3.24: Profilo di densità di corrente in A/m^2 quando in ingresso $p=50$ kPa. La scala è stata uniformata a quella delle figure 3.22, 3.26, 3.28 e 3.30 per una più agevole confrontabilità dei risultati.

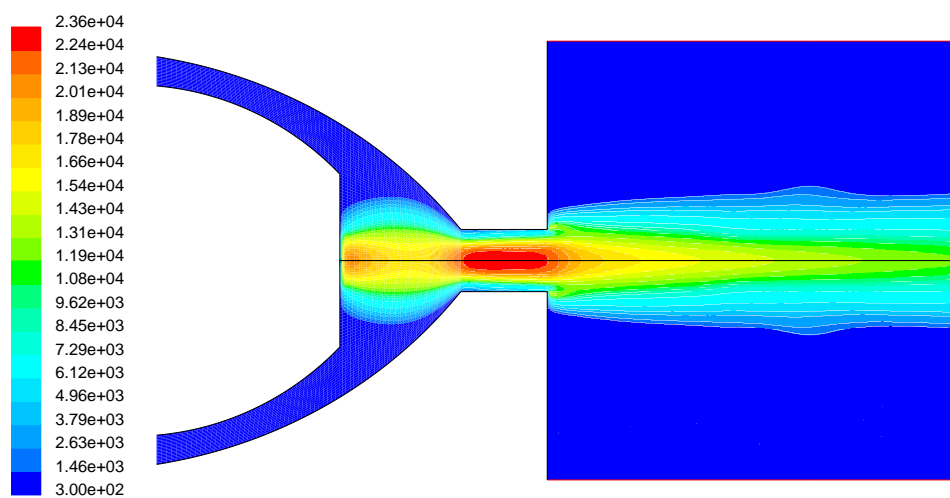


Figura 3.25: Profilo di temperatura in K quando in ingresso $p=50$ kPa.

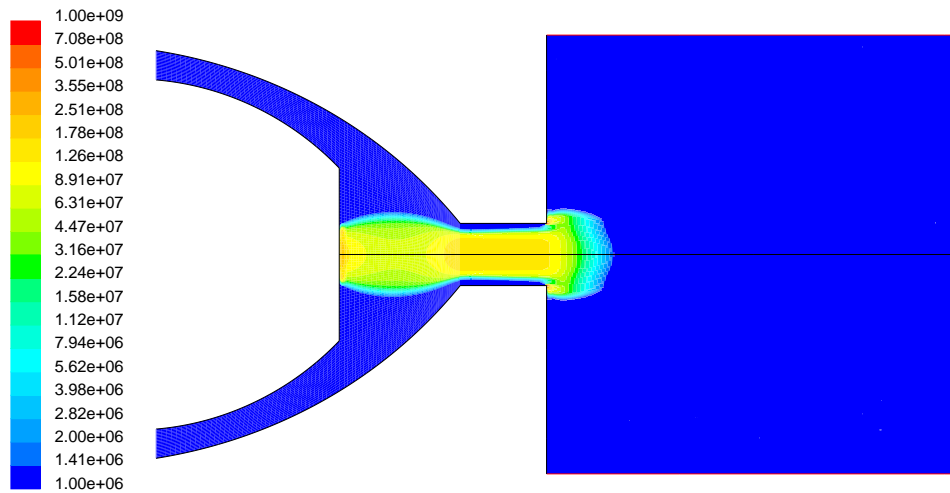


Figura 3.26: Profilo di densità di corrente in A/m^2 quando in ingresso $p=70$ kPa. La scala è stata uniformata a quella delle figure 3.22, 3.24, 3.28 e 3.30 per una più agevole confrontabilità dei risultati.

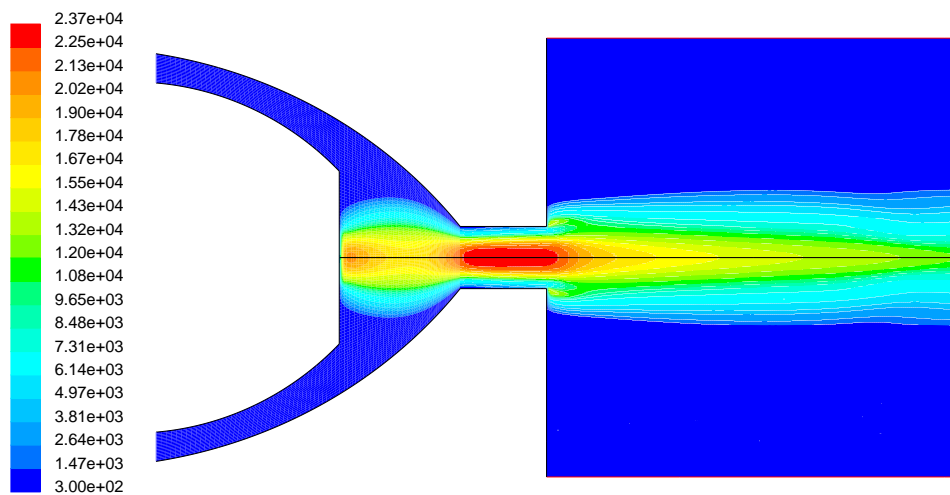


Figura 3.27: Profilo di temperatura in K quando in ingresso $p=70$ kPa.

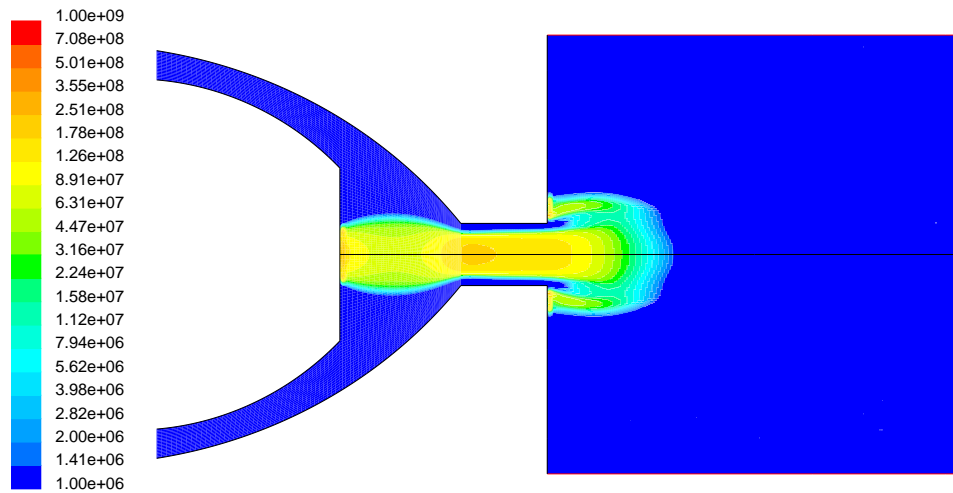


Figura 3.28: Profilo di densità di corrente in A/m^2 quando in ingresso $p=80$ kPa. La scala è stata uniformata a quella delle figure 3.22, 3.24, 3.26 e 3.30 per una più agevole confrontabilità dei risultati.

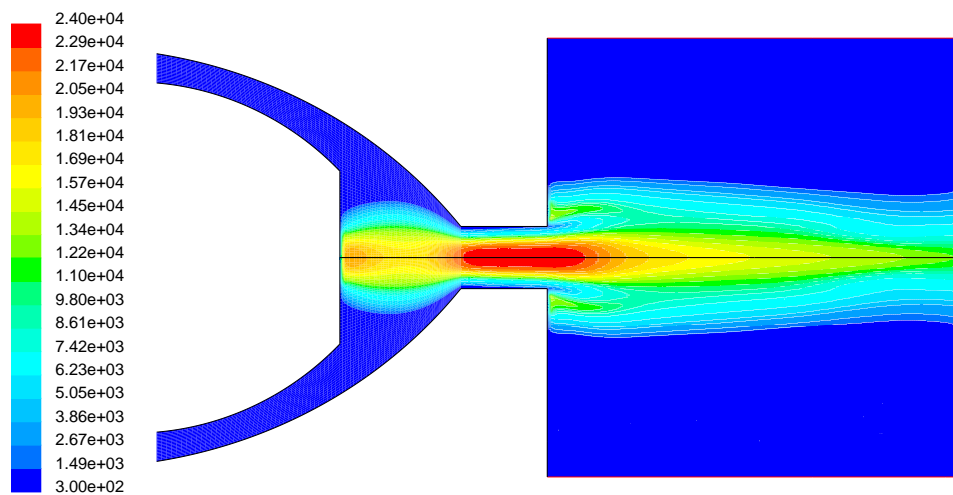


Figura 3.29: Profilo di temperatura in K quando in ingresso $p=80$ kPa.

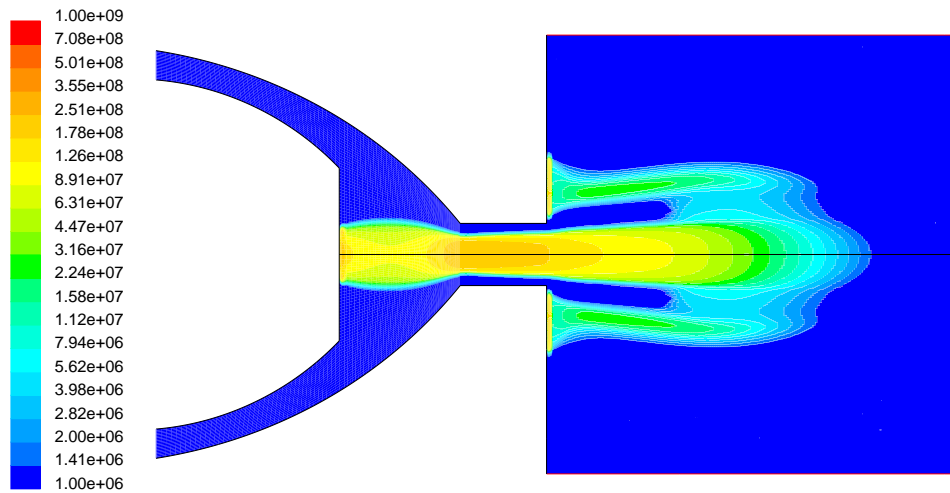


Figura 3.30: Profilo di densità di corrente in A/m^2 quando in ingresso $p=150$ kPa. La scala è stata uniformata a quella delle figure 3.22, 3.24, 3.26 e 3.28 per una più agevole confrontabilità dei risultati.

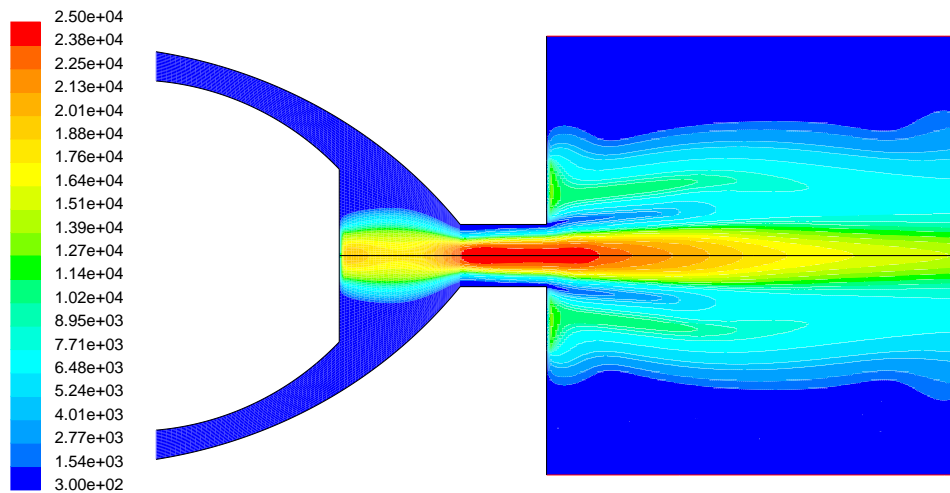


Figura 3.31: Profilo di temperatura in K quando in ingresso $p=150$ kPa.

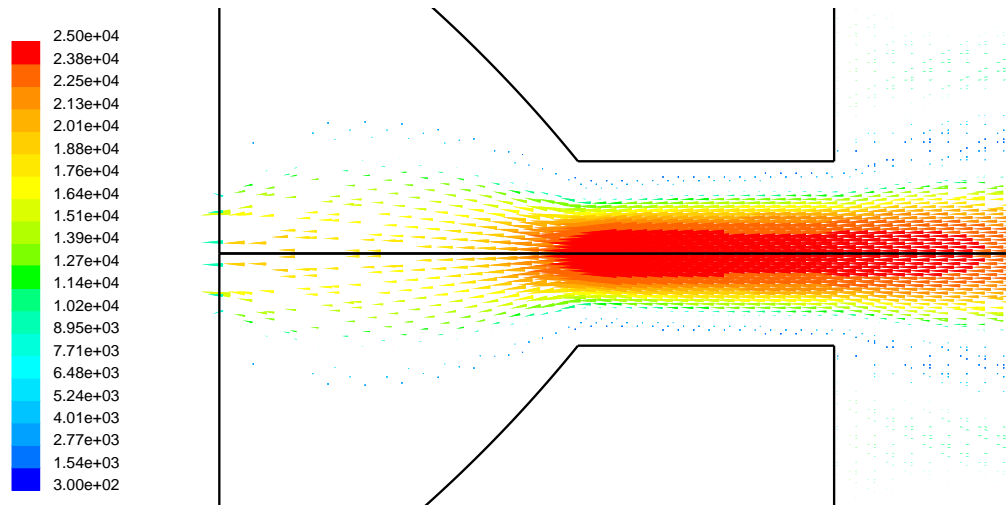


Figura 3.32: Profilo di temperatura in K con vettori j quando in ingresso $p=150$ kPa, particolare.

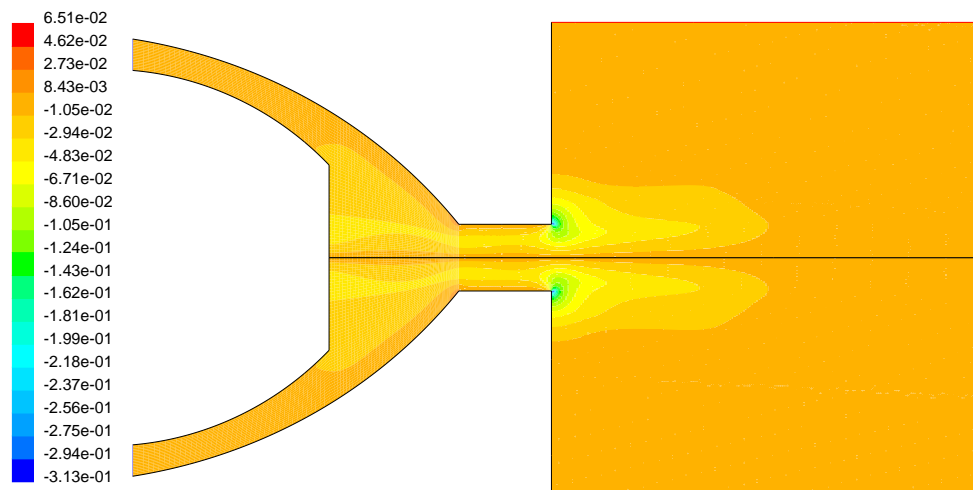


Figura 3.33: Profilo di intensità del campo magnetico in T quando in ingresso $p=150$ kPa.

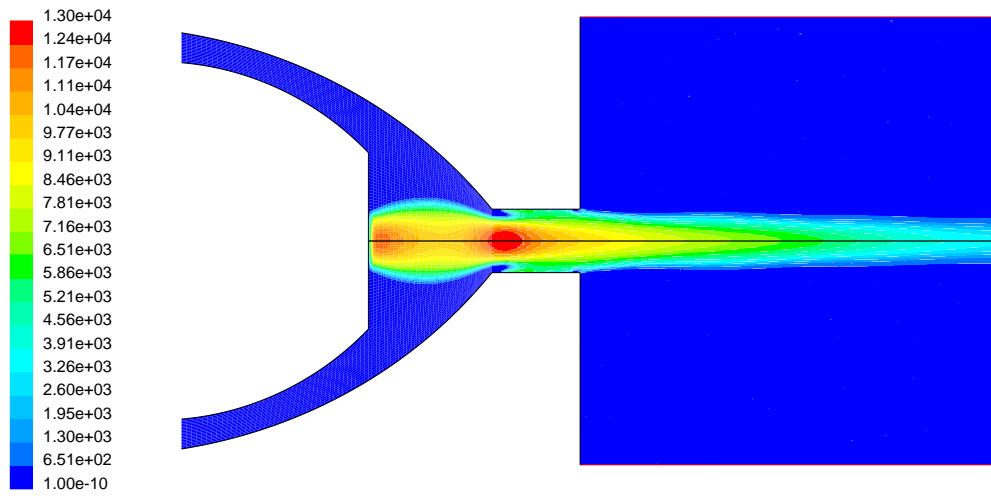


Figura 3.34: Profilo di conducibilità del plasma in $\Omega^{-1}m^{-1}$ in quando in ingresso $p=50$ kPa.

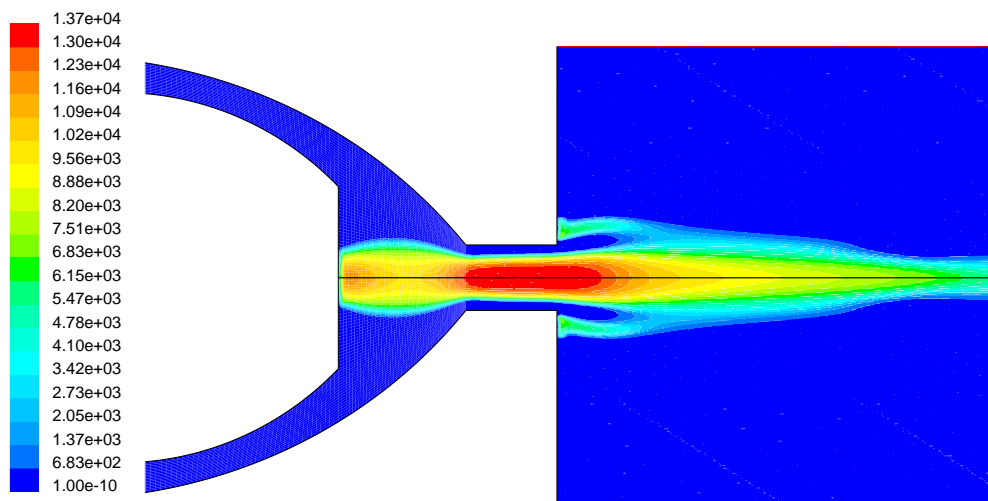


Figura 3.35: Profilo di conducibilità del plasma in $\Omega^{-1}m^{-1}$ quando in ingresso $p=80$ kPa.

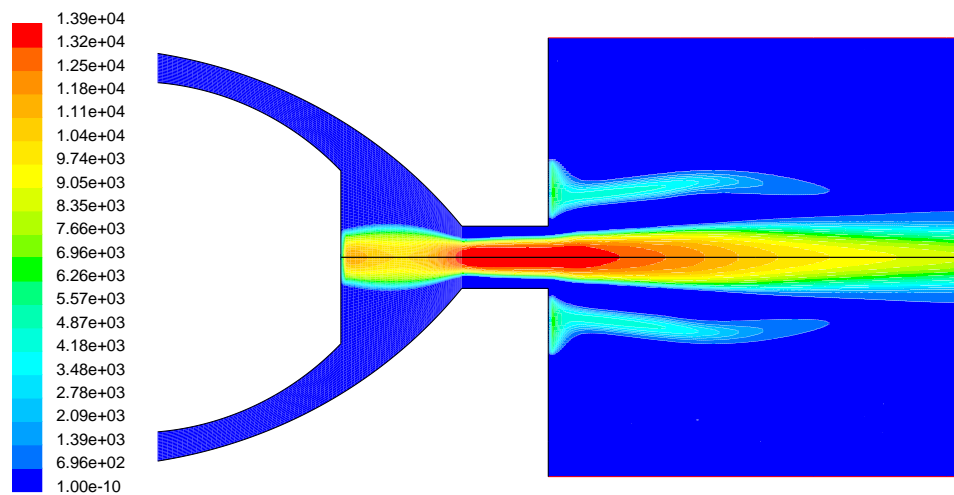


Figura 3.36: Profilo di conducibilità del plasma in $\Omega^{-1}m^{-1}$ quando in ingresso $p=150$ kPa.

3.3 Simulazione con arco trasferito

3.3.1 Impostazione del problema

Le simulazioni in condizioni di arco trasferito hanno molto in comune con quelle in condizioni di arco pilota, le uniche differenze a livello di modello riguardano i parametri elettrici imposti:

- **pareti dell'ugello:** viene imposto un gradiente del campo elettrico pari a zero, a differenza del precedente vincolo di potenziale nullo;
- **uscita del gas dalla camera di scarico** (zona (g) di figura 3.11): il vincolo imposto è potenziale nullo.

La corrente imposta è sempre di 134 A.

La simulazione in arco trasferito, come si può notare dalla seconda condizione al contorno sopra elencata, presuppone l'esistenza di un '*anodo fittizio*' in corrispondenza della parete di scarico di fronte all'uscita del getto. Tale anodo deve essere in grado, in base alle condizioni imposte, di ricevere tutti gli elettroni provenienti dal catodo ed al contempo di non deviare il getto di plasma, che, in presenza di un vero anodo, risentirebbe invece della presenza di un ostacolo, non attraversabile se non nella zona del foro. L'approssimazione introdotta risulta accettabile solo se ci si limita ad analizzare il comportamento del sistema in prossimità dell'ugello, zona in cui l'effetto dell'anodo sulla forma del getto è trascurabile.

3.3.2 Risultati

La prima simulazione del comportamento della torcia in modalità ad arco trasferito è stata effettuata a partire dai risultati ottenuti in modalità di arco pilota, quando la pressione in ingresso imposta era 70 kPa. Questa tecnica ha permesso una veloce convergenza, in quanto i campi di temperatura e velocità delle due simulazioni erano simili.

I risultati ottenuti mostrano come all'aumentare della pressione si assista ad un prevedibile aumento del numero di nodi di Mach (figure 3.37, 3.39 e 3.41), con la conseguente presenza di picchi di velocità (figure 3.38, 3.40, 3.42).

Oltre a questo, si osserva una riduzione del diametro della scarica (figure 3.43 e 3.44), con un effetto sul profilo di temperatura (figure 3.45 e 3.46): una

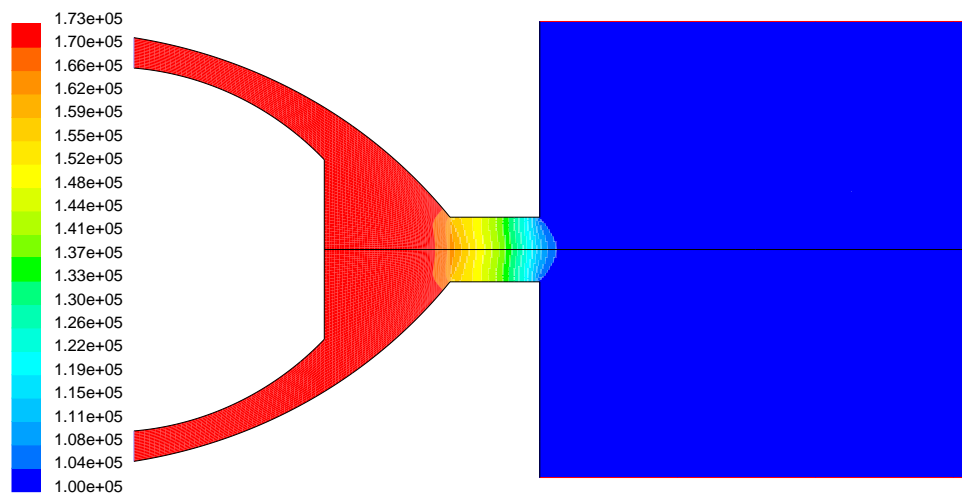


Figura 3.37: Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso $p=70$ kPa.

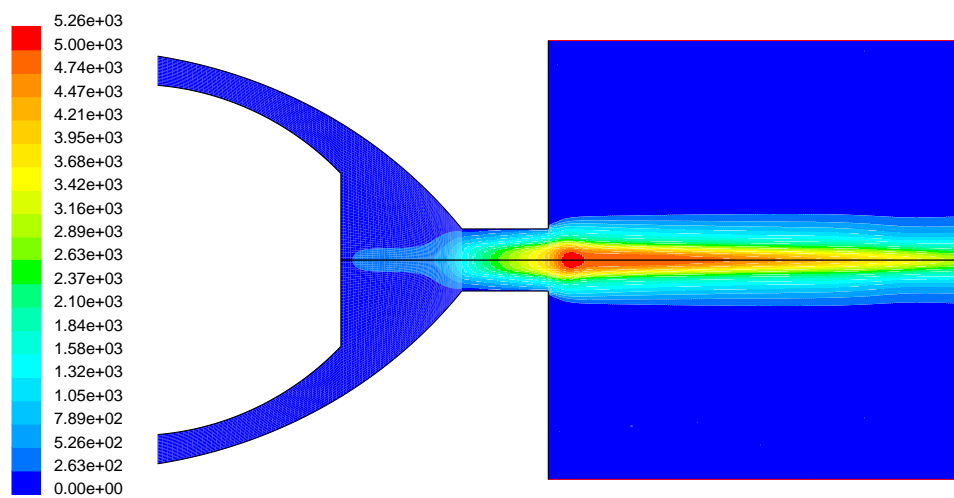


Figura 3.38: Profilo di velocità in m/s quando in ingresso $p=70$ kPa.

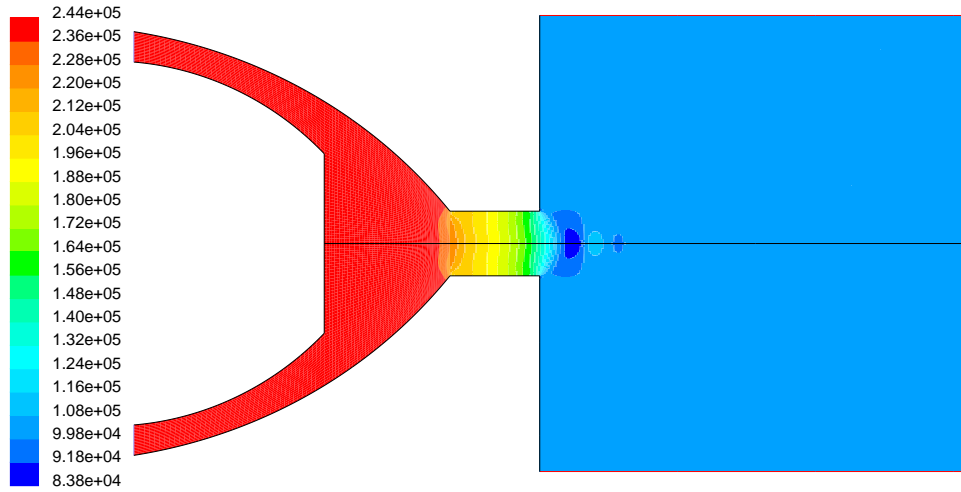


Figura 3.39: Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso $p=140$ kPa.

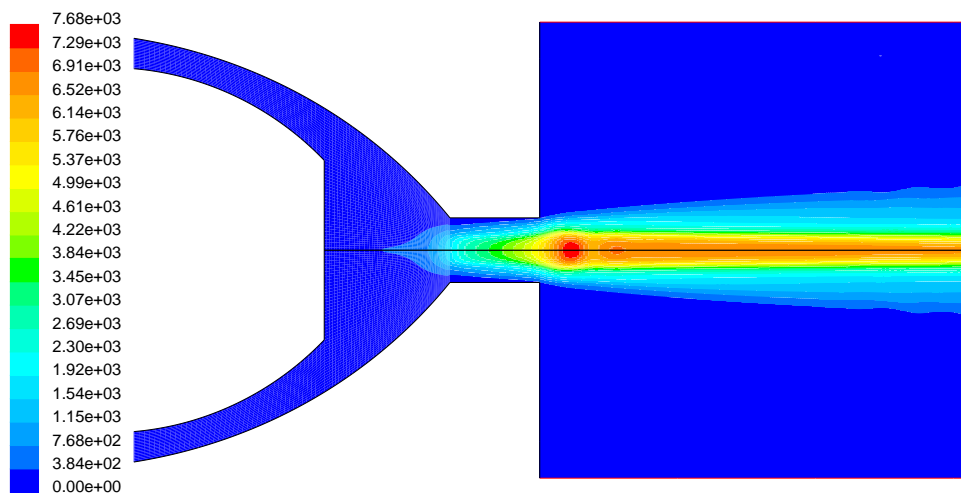


Figura 3.40: Profilo di velocità in m/s quando in ingresso $p=140$ kPa.

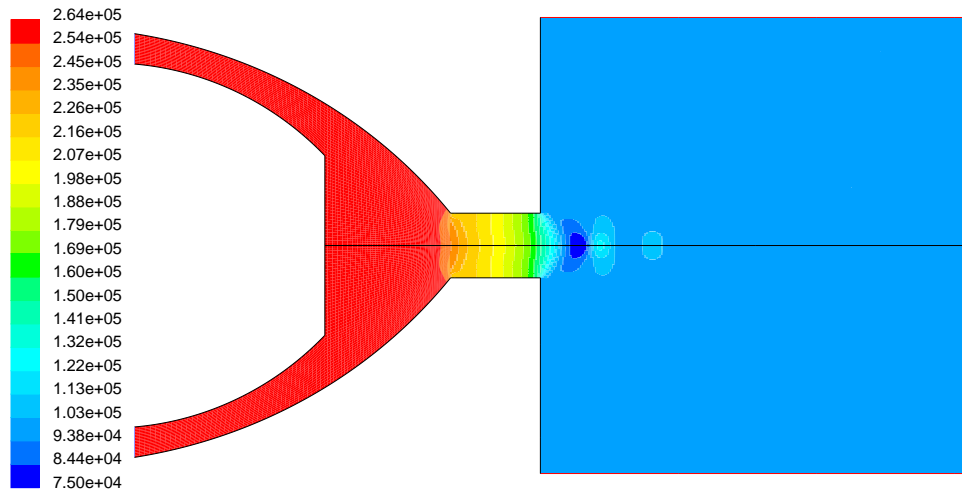


Figura 3.41: Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso $p=160$ kPa.

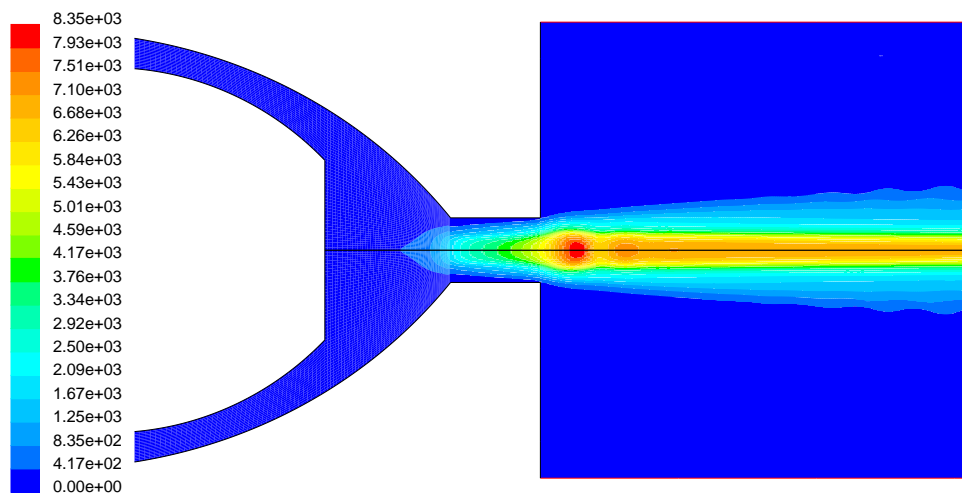


Figura 3.42: Profilo di velocità in m/s quando in ingresso $p=160$ kPa.

scarica di diametro inferiore dissipa la sua energia su un volume di gas minore. La variazione del diametro della scarica è legata a molteplici fattori, legati l'uno all'altro: la forza di Lorentz ($\vec{F} = \vec{j} \wedge \vec{B}$) aumenta all'aumentare della velocità dei portatori di carica (effetto su \vec{j}), così come aumenta all'aumentare del campo magnetico \vec{B} , il quale dipende però dalla densità di corrente del getto, inversamente proporzionale alla superficie del getto. L'effetto combinato di questi fattori sul profilo del campo magnetico è mostrato nelle figure 3.49 e 3.50.

All'aumentare della pressione, lo swirl (figure 3.47 e 3.48) aumenta nella zona oltre l'ugello più che all'interno dell'ugello stesso: il rapporto fra velocità di swirl nel condotto alle pressioni considerate è di circa 2.5, mentre nella zona di espansione supera il valore 3, interessando, inoltre, più intimamente il getto di plasma, non solo la zona prossima all'asse. La causa di questo aumento all'interno dell'ugello si può individuare nella riduzione di diametro della scarica, la quale lascia uno spazio freddo maggiore, attraverso cui passa una portata maggiore di gas. Nella zona del getto in aria si può invece ipotizzare che lo swirl, di intensità in partenza maggiore, sia sufficientemente intenso da trascinare il getto, evento impossibile quando l'intensità è di pochi m/s in partenza.

Si può osservare nella figura 3.48 la presenza, nel confine fra getto ed aria circostante, di anomalie dovute a rumore numerico, visualizzato come 'sbavature' del profilo di velocità. Queste 'bave' derivano dalla non perfetta convergenza della simulazione: al procedere delle iterazioni, nascevano nella zona immediatamente successiva all'ugello e si spostavano progressivamente verso il confine della griglia. La loro presenza suggerisce l'utilità di impostare le future simulazioni con un modello turbolento, che permetta anche lo studio del comportamento della torcia per pressioni di alimentazione superiori: le simulazioni effettuate hanno dato come risultato di accettabile convergenza valori di pressione di 160 kPa, inferiore a quella rilevata in laboratorio, 240 kPa.

Il motivo dell'interruzione delle simulazioni per tale valore deriva da problemi computazionali in cui si incorreva in corrispondenza dei nodi di Mach, anche in presenza di forti sottorilassamenti. La causa è stata individuata nei gradienti di pressione (la differenza tra i valori in una cella ed in quella adiacente) troppo elevati. Per risolvere il problema si prospettavano due alternative: o infittire la griglia, così da ridurre le dimensioni delle celle e quindi il gradiente di pressione, oppure passare al modello viscoso "k-ε" (come già accennato ad inizio paragrafo).

Sono state sperimentate entrambe le possibilità: da una parte il cambiamento del modello viscoso non ha migliorato la situazione, non avendo conseguito una soluzione stabile; d'altronde l'alternativa di infittire la griglia ha comportato,

sì, leggeri miglioramenti, ma accompagnati da incrementi consistenti dei tempi di calcolo; ulteriore investimento di tempo in simulazioni bidimensionali che è stato reputato inutile, essendo già in corso simulazioni tridimensionali sulla stessa geometria.

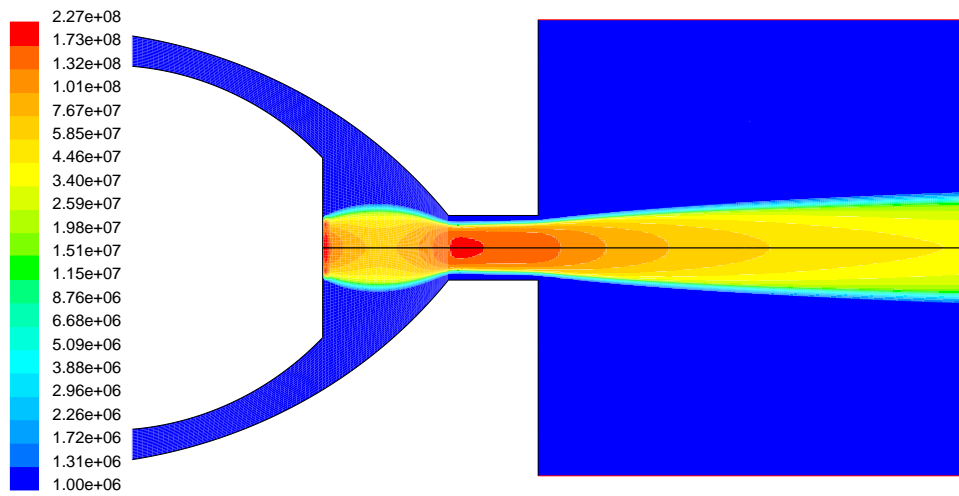


Figura 3.43: Profilo di densità di corrente in A/m^2 quando in ingresso $p=70$ kPa.

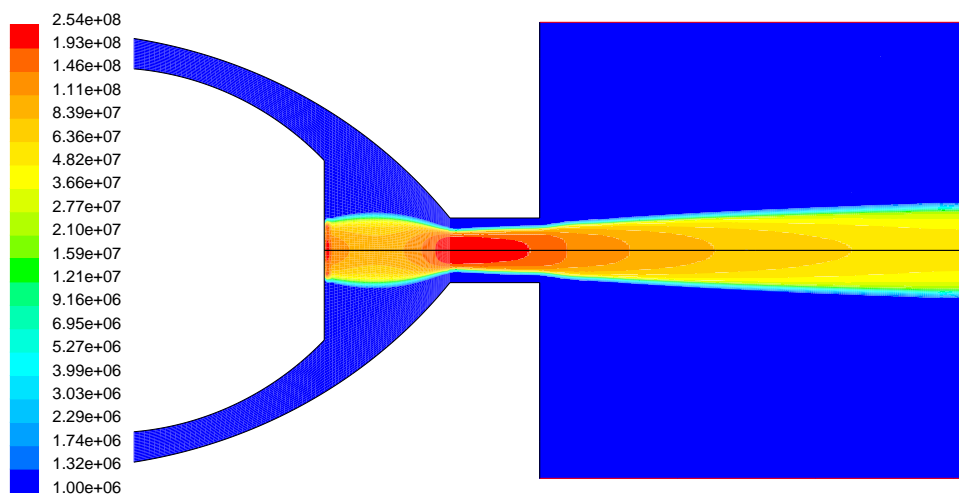


Figura 3.44: Profilo di densità di corrente in A/m^2 quando in ingresso $p=160$ kPa.

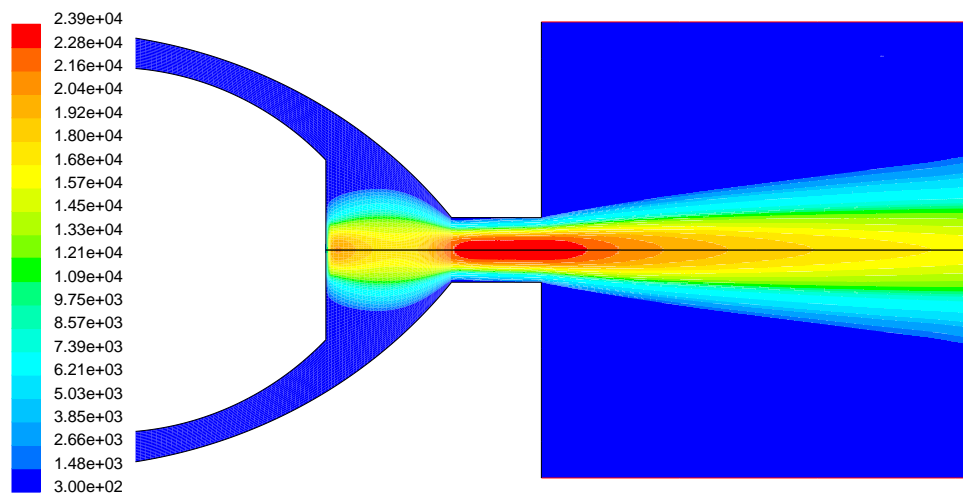


Figura 3.45: Profilo di temperatura in K quando in ingresso $p=70$ kPa.

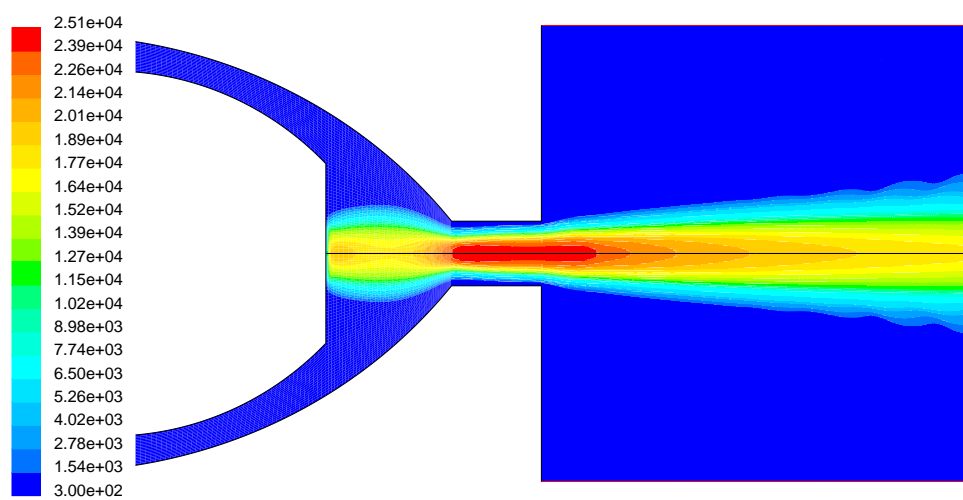


Figura 3.46: Profilo di temperatura in K quando in ingresso $p=160$ kPa.

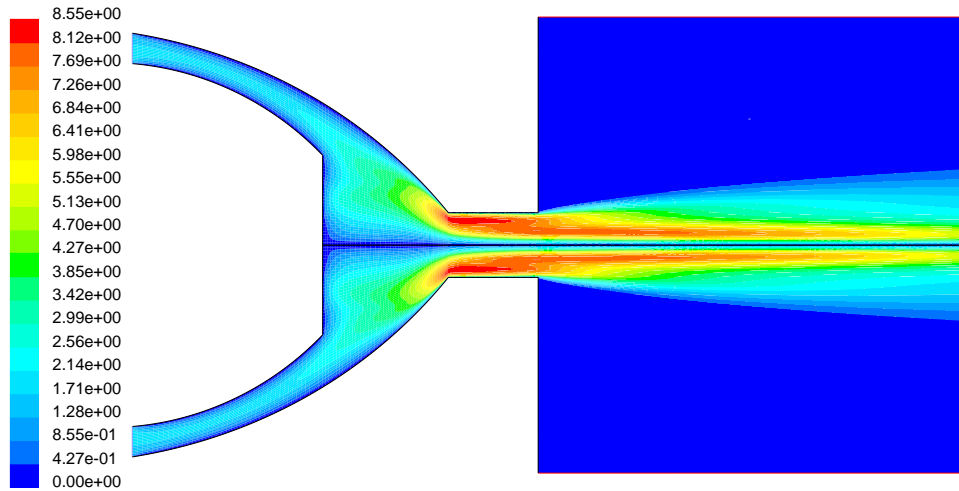


Figura 3.47: Profilo di velocità di swirl in m/s quando in ingresso $p=70$ kPa.

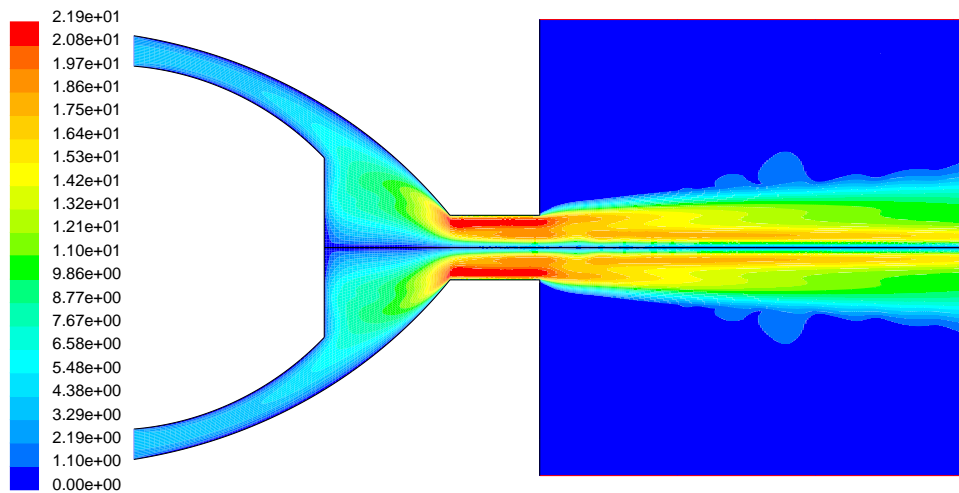


Figura 3.48: Profilo di velocità di swirl in m/s quando in ingresso $p=160$ kPa.

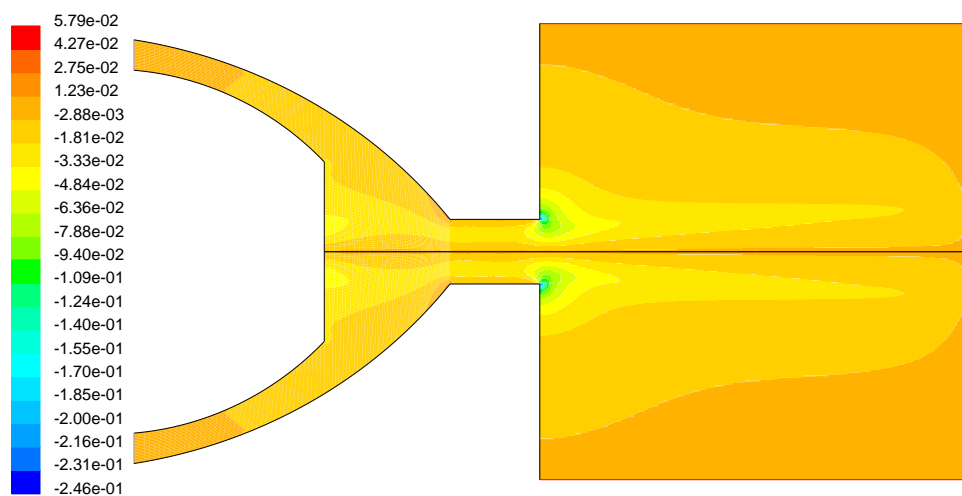


Figura 3.49: Profilo di intensità del campo magnetico in T quando in ingresso $p=70$ kPa.

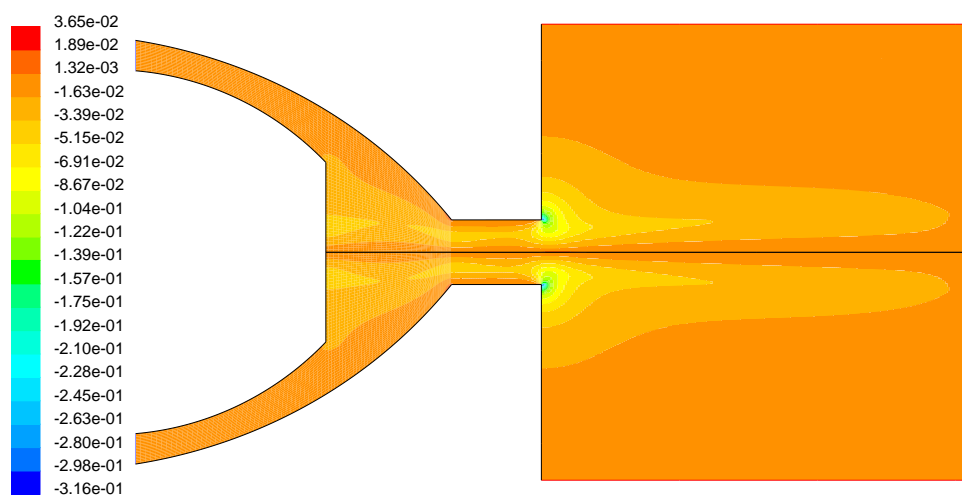


Figura 3.50: Profilo di intensità del campo magnetico in T quando in ingresso $p=160$ kPa.

Capitolo 4

Conclusioni e prospettive future

L'attività svolta si è concentrata sulla modellazione al calcolatore, mediante applicativo "Fluent", della torcia da taglio Cebora CP160, già oggetto di precedenti misurazioni in laboratorio. Le situazioni di funzionamento studiate sono quelle a regime: passaggio di solo gas ad arco spento, arco pilota (arco non trasferito) e modalità di arco trasferito fra elettrodo e pezzo da tagliare.

Le simulazioni in mancanza di alimentazione (solo flusso dell'aria) hanno indicato il raggiungimento della velocità del suono in corrispondenza della pressione di 70 kPa (con ipotesi di flusso laminare del gas) e, una volta attivato il modello "k- ϵ ", la presenza di intensi fenomeni turbolenti, localizzati in prevalenza nella zona di espansione.

I risultati mostrano chiaramente come le ipotesi di assialsimmetria del sistema, di pareti considerate perfettamente lisce e la decisione di limitare la simulazione alla zona terminale della torcia impediscano, prese nel complesso, di studiare gli effetti della turbolenza che si instaura a causa della geometria dei condotti di alimentazione ed a causa dalle imperfezioni delle superfici. A riprova di tali considerazioni, la portata di fluido calcolata numericamente risulta più che doppia di quella reale.

L'ipotesi di assialsimmetria della geometria, fra quelle sopra elencate, è un caso particolare: essa impedisce di conoscere con esattezza il moto del fluido, in quanto obbliga a supporre l'iniezione di gas omogenea su tutta la circonferenza, ma, in questa simulazione, incide poco sulle caratteristiche del moto del gas nella zona prossima all'ugello. Confrontando, infatti, i risultati delle simulazioni da me portate a termine e quelli, preliminari, prodotti dal gruppo di ricerca del DIEM, si osserva come le discrepanze maggiori si abbiano nella zona iniziale, prossima ai condotti di iniezione, mentre l'ugello risente lievemente dell'effetto della semplificazione adottata. Queste considerazioni

sono avvalorate dalla letteratura, nella quale è frequente trovare simulazioni assialsimmetriche di torce al plasma (cfr. [6], [8]).

I risultati ottenuti nelle condizioni di funzionamento ad arco non trasferito mostrano una forte dipendenza, nella zona oltre l'ugello, della forma della scarica e dei campi di temperatura dal valore di pressione di alimentazione imposto. Tale variazione può risultare importante al momento del trasferimento dell'arco sul pezzo, in quanto temperature più alte del getto comportano canali conduttivi più ampi e profondi, nei quali la scarica può incanalarsi più velocemente.

L'ipotesi di assialsimmetria mostra, in questa fase del lavoro, gli stessi limiti discussi sopra: impossibilità di conoscere con esattezza il moto del fluido, in particolare nella zona di iniezione e nella zona successiva all'ugello. Gli errori che ne conseguono in quest'ultima parte del dominio sono però di entità maggiore rispetto al caso a freddo: la scarica viene vincolata ad essere assialsimmetrica, mentre nella realtà, per effetto delle forze di costrizione, essa assume una configurazione a canale singolo con attacco puntiforme sull'ugello (la configurazione assialsimmetrica è estremamente instabile).

Nonostante gli inevitabili errori dovuti alle ipotesi semplificative adottate, i risultati riferiti alla camera del plasma e all'interno del condotto dell'ugello possono comunque considerarsi utili, poiché, come nel caso a freddo, in tali zone non vi sono elementi che facciano pensare ad una forte violazione dell'ipotesi di assialsimmetria. Al momento non è però possibile verificare questa ipotesi: non sono ancora state eseguite simulazioni tridimensionali della torcia CP160 in modalità di arco pilota.

Le simulazioni ad arco trasferito non hanno mostrato variazioni sostanziali delle caratteristiche di getto e scarica all'aumentare della pressione in ingresso. La forma della scarica è rimasta, infatti, quasi invariata nelle varie configurazioni, con solo una riduzione del proprio diametro a causa dell'effetto combinato della maggiore velocità del plasma e dell'aumentata intensità del campo magnetico, i quali originano forze di Lorentz costrittive più intense. La temperatura di picco del getto è, al contrario, aumentata di pari passo con la pressione, poiché quest'incremento ha implicato un aumento di densità del gas e quindi una maggiore interazione fra esso ed i portatori di carica (elettroni ed ioni).

I risultati ottenuti lasciano pensare che un modello assialsimmetrico sia accettabile per rappresentare la situazione di arco trasferito: poiché la scarica è collocata lungo l'asse della torcia e le forze di Lorentz agiscono verso l'asse, il sistema tende automaticamente verso l'assialsimmetria. Al contrario, come nello studio a freddo, la scelta di un modello laminare palesa la sua inadeguatezza nel rappresentare efficacemente il plasma nella zona oltre l'ugello: il

profilo della velocità di swirl risulta caratterizzato, nel confine fra getto ed aria circostante, da alcune anomalie imputabili alla presenza di turbolenza, ignorata dal modello viscoso utilizzato.

I risultati ottenuti a freddo e con arco trasferito sono già stati impiegati per ottenere informazioni utili alla definizione delle griglie dei modelli tridimensionali (così da ridurre la dimensione delle celle nelle zone con i gradienti più forti) e come punto di riferimento per il confronto dei risultati successivamente ottenibili.

Per affrontare le problematiche sopra esposte si può operare su tre fronti:

- **analisi tridimensionale della geometria delle torce:** può essere modellata l'iniezione non uniforme di gas nella torcia, causa di turbolenza e di moti non assialsimmetrici che si propagano fino all'ugello e che influenzano poi la forma del getto. Il valore di inclinazione in ingresso del gas diventa informazione generata dall'algoritmo, mentre nelle simulazioni fin qui trattate era un parametro fisso, fornito come condizione al contorno;
- **estensione del dominio di calcolo:** permette l'inclusione dei condotti di iniezione di gas e dell'intera geometria, quindi le condizioni al contorno possono essere fissate nei punti in cui sono note con maggiore precisione da misure sperimentali. A titolo di esempio, nei casi precedentemente trattati la pressione era imposta appena a valle della zona di iniezione, mentre il valore esatto era conosciuto a monte ed a valle di quel punto;
- **utilizzo di modelli turbolenti:** sia le simulazioni ad arco spento che ad arco trasferito hanno mostrato la presenza di turbolenza di rilevanza tale da impedire la convergenza in caso di utilizzo di un modello laminare. Una simulazione che miri a ricreare le esatte condizioni di funzionamento delle torce reali non può quindi tralasciare i fenomeni turbolenti presenti nel getto.

Altri possibili approcci verso lo studio numerico di torce al plasma sono l'estensione del dominio di calcolo fino ad inglobare il pezzo da tagliare e l'analisi dipendente dal tempo del comportamento dell'arco.

L'**ampliamento del dominio** è utile per conoscere le interazioni tra plasma ed anodo, così da poter studiare il fenomeno nella sua interezza, non solo una ipotetica scarica che interagisce con un anodo virtuale. Una simulazione che comprenda anche il substrato permetterebbe inoltre di studiare l'effetto, non altrimenti analizzabile, che la variazione di parametri quali distanza fra

ugello e pezzo e profondità del taglio ha sul sistema, fino a permettere un raffronto diretto dei risultati numerici con quelli di laboratorio.

L'**analisi dell'arco** è più complessa ed il suo studio richiede simulazioni *dipendenti dal tempo*, le quali riproducono, istante per istante, il valore i tutti i parametri del gas e del campo elettrico all'interno del dominio modellato. Tale tipo di studio può essere applicato a cinque fasi della 'vita' dell'arco:

- *transitorio di accensione dell'arco*: il dielettrico si rompe a causa dell'impulso di tensione inviato dal generatore, dopodiché la scarica nasce come colonnina di plasma e si sposta fino a portarsi nella configurazione di arco pilota. La conoscenza di questo processo è importante per ridurre il consumo (massimo in questa fase) dell'afnio ed allungare quindi la vita dell'elettrodo;
- *funzionamento in arco pilota*: durante questa fase la scarica non è statica ma la sua attaccatura si sposta sull'ugello. La conoscenza di come ciò accada può essere utile per ottimizzare il getto in funzione del successivo trasferimento;
- *transitorio di trasferimento sul pezzo*: il potenziale nel pezzo da tagliare viene imposto a zero, mentre viene isolato elettricamente l'ugello. Questa simulazione mira a conoscere come il processo avvenga;
- *funzionamento in regime di arco trasferito, con simulazione di un taglio*: questa fase è molto importante, in quanto mostra come procede il taglio e quali interazioni si abbiano fra getto, metallo fuso e metallo solido. Tuttavia, se potenzialmente potrebbe portare alla conoscenza di numerosi parametri del getto di plasma – il processo di formazione di 'bave' sul lato inferiore del pezzo, ad esempio –, la complessità della simulazione e l'elevato numero di variabili in gioco (metallo in più stati di aggregazione ed asportazione di materia dal dominio per citarne alcune) la rendono di fatto impossibile da portare a termine su calcolatori odierni;
- *spegnimento dell'arco*: tale transitorio è utile per conoscere il processo di raffreddamento dell'afnio, anch'esso importante in un'ottica di ottimizzazione del consumo di tale materiale.

La torcia CP160 da me studiata in due dimensioni è al momento oggetto di studi più approfonditi da parte del gruppo di ricerca nell'ambito del quale sono state generate le griglie da me utilizzate. Tali simulazioni utilizzano un modello tridimensionale, esteso fino ai condotti di alimentazione, per lo studio dei fenomeni non assialsimmetrici presenti, mentre per la rappresentazione

della turbolenza impiegano il modello “k- ϵ ”.

Parallelamente a queste, è in corso una simulazione di taglio semplificata che modella il fenomeno come stazionario, trascurando, quindi, gli effetti di fusione/risolidificazione e l’asportazione di metallo dal dominio. Obiettivo di tali indagini è il raggiungimento di una migliore conoscenza della forma dell’attacco della corrente sul pezzo quando quest’ultimo ha una profondità definita anziché essere ‘virtuale’, come nel caso delle simulazioni da me concluse.

Simulazioni dei fenomeni transitori sono invece pianificate per il prossimo futuro; esse riguarderanno accensione e trasferimento, dopo accurate valutazioni in termini di rapporti costi/beneficio e tenuto conto dei comunque elevati livelli di idealizzazione di alcuni dei fenomeni che si dovrebbero tenere in considerazione, non è previsto nessun tentativo di modellazione del processo completo di taglio.

Ringraziamenti

Ringrazio tutti coloro che mi hanno aiutato o sostenuto nel lavoro di produzione di questa mia tesi di laurea, ed in particolare:

i miei genitori Nives ed Oliviero e mia sorella Ambra, perché la famiglia è un elemento sempre importante;

Giacomo, Federico ed Alessia, perché la visione del mondo degli ingegneri è assai diversa da quella dei biotecnologi (molto interessante ;-)) e perché la matematica non è tutto;

gli amici più vicini: Camillo, Raffaella, Stefania e Gennaro, Giovanni, Monica, Silvia, Alessandra;

i miei compagni di corso di laurea ed in particolare Giovanni (Masa) e Christian;

i compagni di vita al CIRAM, in particolare Sandro ed Alice.

Un ringraziamento speciale al gruppo di ricerca sui plasmi del DIEM: prof. Vittorio Colombo, ing. Emanuele Ghedini, ing. Andrea Mentrelli.

Elenco delle figure

1.1	Schema di una torcia ad arco non trasferito (cfr. [4]). Le dimensioni sono espresse in mm.	7
1.2	Possibili metodi di iniezione del gas in una torcia ad arco.	9
1.3	Schema del modello minimo di torcia ad arco trasferito, cosiddetto “ <i>free burning arc</i> ”.	9
1.4	Schema torcia in modalità di arco pilota e di arco trasferito sul pezzo.	11
3.1	Griglia utilizzata per la simulazione a freddo della torcia CP160.	20
3.2	Profilo di velocità in m/s nel dominio con pressione in ingresso imposta di 70 kPa.	21
3.3	Vettori di velocità nella zona di espansione passato l’ugello, colorati in base al valore della velocità assiale in m/s, quando in ingresso $p=70$ kPa.	22
3.4	Profilo di pressione assoluta in Pa nel dominio quando in ingresso $p=70$ kPa.	22
3.5	Profilo di velocità in m/s con pressione in ingresso imposta di 105 kPa.	24
3.6	Profilo di velocità espressa come numero di Mach con pressione in ingresso imposta di 105 kPa.	25
3.7	Profilo della variabile k (energia cinetica turbolenta) in m^2/s^2 quando in ingresso $p=105$ kPa.	25
3.8	Particolare della figura 3.7.	26
3.9	Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso $p=105$ kPa.	26

3.10	Profilo della velocità di swirl in m/s nel dominio quando in ingresso p=105 kPa, particolare.	27
3.11	Griglia utilizzata per la simulazione a caldo della torcia CP160.	28
3.12	Viscosità dell'aria in funzione della temperatura.	30
3.13	Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso p=50 kPa.	31
3.14	Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso p=70 kPa.	32
3.15	Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso p=150 kPa.	32
3.16	Profilo di velocità lungo l'asse della torcia per p=50 kPa. . . .	34
3.17	Profilo di velocità in m/s quando in ingresso p=50 kPa.	34
3.18	Profilo di velocità lungo l'asse della torcia per p=70 kPa. . . .	35
3.19	Profilo di velocità in m/s quando in ingresso p=70 kPa.	35
3.20	Profilo di velocità lungo l'asse della torcia per p=150 kPa. . . .	36
3.21	Profilo di velocità in m/s quando in ingresso p=150 kPa.	36
3.22	Profilo di densità di corrente quando p=15 kPa.	38
3.23	Profilo di temperatura in K quando in ingresso p=15 kPa.	38
3.24	Profilo di densità di corrente quando p=50 kPa.	39
3.25	Profilo di temperatura in K quando in ingresso p=50 kPa.	39
3.26	Profilo di densità di corrente quando p=70 kPa.	40
3.27	Profilo di temperatura in K quando in ingresso p=70 kPa.	40
3.28	Profilo di densità di corrente quando p=80 kPa.	41
3.29	Profilo di temperatura in K quando in ingresso p=80 kPa.	41
3.30	Profilo di densità di corrente quando p=150 kPa.	42
3.31	Profilo di temperatura in K quando in ingresso p=150 kPa.	42
3.32	Profilo di temperatura in K con vettori j quando in ingresso p=150 kPa, particolare.	43
3.33	Profilo di intensità del campo magnetico in T quando in ingresso p=150 kPa.	43
3.34	Profilo di conducibilità del plasma in $\Omega^{-1}m^{-1}$ in quando in ingresso p=50 kPa.	44
3.35	Profilo di conducibilità del plasma in $\Omega^{-1}m^{-1}$ quando in ingresso p=80 kPa.	44

3.36	Profilo di conducibilità del plasma in $\Omega^{-1}m^{-1}$ quando in ingresso p=150 kPa.	45
3.37	Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso p=70 kPa.	47
3.38	Profilo di velocità in m/s quando in ingresso p=70 kPa.	47
3.39	Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso p=140 kPa.	48
3.40	Profilo di velocità in m/s quando in ingresso p=140 kPa.	48
3.41	Profilo di pressione assoluta in Pa quando in ingresso p=160 kPa.	49
3.42	Profilo di velocità in m/s quando in ingresso p=160 kPa.	49
3.43	Profilo di densità di corrente in A/m ² quando in ingresso p=70 kPa.	52
3.44	Profilo di densità di corrente in A/m ² quando in ingresso p=160 kPa.	52
3.45	Profilo di temperatura quando in ingresso p=70 kPa.	53
3.46	Profilo di temperatura quando in ingresso p=160 kPa.	53
3.47	Profilo di velocità di swirl in m/s quando in ingresso p=70 kPa.	54
3.48	Profilo di velocità di swirl in m/s quando in ingresso p=160 kPa.	54
3.49	Profilo di intensità del campo magnetico in T quando in ingresso p=70 kPa.	55
3.50	Profilo di intensità del campo magnetico in T quando in ingresso p=160 kPa.	55

Bibliografia

- [1] Gittens T.E., *Plasma arc cutting process fundamentals*, AFS transactions, (84-180), (1984), pp29-35;
- [2] Laroche G., Orfeuill M., *Les plasmas dans l'industrie*, Electricité de France, Doppee85, (1991);
- [3] Swan, Washington University, USA: www.tadda.wsu.edu/201/plasma2/history.htm;
- [4] Autori vari, *Thermal Plasmas for Hazardous Waste Treatment*, World Scientific, (1995).
- [5] M. I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender, *Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications*, vol. 1, Plenum Press, New York (1994).
- [6] Sandro Melini, *Analisi fisica e modellazione tridimensionale per la caratterizzazione stazionaria e dipendente dal tempo finalizzata al progetto di torce al plasma a corrente continua ad arco trasferito*, Tesi di laurea in Ingegneria Nucleare, Università di Bologna, (2004).
- [7] Joel H. Ferziger, Milovan Perić, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer 1997.
- [8] P. Freton, *Etude d'un arc de découpe par plasma d'oxygène Modélisation – expérience*, Tesi di dottorato in Physique et ingénierie des plasmas de décharge, L'Université P. Sabatier, Toulouse III (2002).
- [9] Hypertherm Inc., <http://www.hypertherm.com/technology/long-life.htm>.
- [10] Barbara Binda, *Modellazione analitica dell'andamento della temperatura nel taglio al plasma ad alta definizione*, Tesi di laurea in Ingegneria Gestionale, Politecnico di Milano, (2000).