Politecnico di Torino

Laurea magistrale in ingegneria meccanica

TAGLIO AL PLASMA: SPERIMENTAZIONE E OTTIMIZZAZIONE DEI PARAMETRI DI TAGLIO SU UN MACCHINARIO CNC

DOCENTE
Prof. Luca Iuliano

CANDIDATO
André Lavanche

TORINO, 2022

Dipinte in queste rive
son dell'umana gente
le magnifiche sorti e progressive
— Giacomo Leopardi

To my parents and my friends.

Abstract

Il plasma è il quarto stato della materia. Esso rappresenta circa il 99% dell'universo conosciuto, sebbene sulla terra la sua presenza sia molto limitata (e infatti venne scoperto solamente alla fine del XIX secolo da Sir William Crookes).
Esso consiste in un gas ionizzato, complessivamente neutro, composto da elettroni, ioni e particelle neutre, e in cui le particelle sono sufficientemente libere da poter essere dominati effetti collettivi. Gli studi su questo stato si sono intensificati notevolmente dopo la metà del 1900 sia in campo astrofisico che in campo tecnologico/ingegneristico.
Per quanto riguarda il campo ingegneristico le principali applicazioni riguardano la raffinazione dei metalli, la loro fusione, lo smaltimento dei rifiuti, la deposizione chimica al plasma, la sintesi chimica al plasma, la sintesi di materiali ceramici avanzati, e altri. La saldatura al plasma e il taglio al plasma sono, quasi certamente, le due applicazioni più famose, e sull'ultima di queste due si concentra questo lavoro.
L'obiettivo di questo testo è quello di offrire una trattazione matematica semplificata dello stato di plasma, per poi spostarsi sugli aspetti più ingegneristici di esso, concentrandosi in particolar modo sul taglio al plasma.

Il primo capitolo è totalmente incentrato sulla trattazione matematica di questo stato, la quale risulta particolarmente articolata, data la particolare natura di questo stato in cui coesistono contemporaneamente aspetti legati sia alla termofluidodinamica che a fenomeni elettromagnetici. Per la stesura di questo capitolo si è fatto particolare riferimento al Volume 1 di *Thermal plasmas. Fundamentals and application* di M.I. Boulos, P. Fachais ed E. Pfender per la prima parte e al testo *Stelle, galassie e universo. Fondamenti di astrofisica* di A. Ferrari per quanto riguarda la parte di modellazione.

Il secondo capitolo vuole offrire un'esposizione della teoria del taglio al plasma e dei particolari fenomeni che lo caratterizzano, necessari per la comprensione di determinati comportamenti, alla base delle considerazioni che verranno fatte successivamente nel testo. Esso termina con alcuni cenni alla normativa ISO 9013 sulla qualità del taglio. Alla base di questo capitolo ci sono gli studi svolti dal Professor Valerian Nemchinsky.

Il terzo capitolo e dedicato alla descrizione di un macchinario CNC per il taglio al plasma, ed in particolar modo di quello utilizzato nella fase di sperimentazione per la composizione di questo lavoro. Per la stesura di questo capitolo si e utilizzato il manuale d'uso *HyPerformance Plasma HPR130XD Manuale d'istruzioni* della Hyperterm.

Il quarto capitolo vuole mostrare l'effetto dei principali parametri di taglio sulla qualità del taglio stesso, attraverso la loro analisi, mettendo in luce i problemi che possono insorgere a seconda della loro variazione, indicando, poi, le azioni correttive che potrebbero risolvere questi inconvenienti. Per la stesura di questo capitolo si e fatto riferimento al manuale *HyPerformance Plasma HPR130XD Manual gas* dell'Hyperterm.

Il quinto capitolo analizza dal punto di vista economico i vantaggi e gli svantaggi osservati direttamente sul campo in occasione dell'introduzione di un macchinario CNC per taglio al plasma, confrontandolo, in particolare, con il sistema presente precedentemente in azienda.

Contents

Abstract **ii**

1 Cenni teorici sulla fisica dei plasmi **1**

1.1 Evoluzione della teoria degli spettri atomici 1
1.2 Introduzione alla meccanica quantistica 4
1.3 Postulati della meccanica quantistica 8
1.4 Teoria microscopica 9
1.5 Distribuzione di Maxwell-Boltzmann 18
1.6 Funzione di partizione 24
1.7 Equazione di Saha 26
1.8 Grandezze caratteristiche del plasma 30
1.8.1 Temperatura di un plasma 30
1.8.2 Differenti tipi di plasma 33
1.8.3 Lunghezza di Debye 34
1.8.4 Parametro di Landau e Parametro del plasma 36
1.8.5 Frequenza del plasma 37
1.8.6 Conduttività di un plasma 38
1.8.7 Frequenza di Larmor 39
1.8.8 Velocità di Alfvén 40
1.9 Modellizzazione di un plasma 41
1.9.1 Teoria delle orbite 42
1.9.2 Teoria cinetica 45
1.9.3 Teoria Magnetoidrodinamica (MHD) 48

2 Taglio al plasma: cenni teorici **51**

2.1 Descrizione del sistema per il taglio al plasma 55
2.2 Analisi del taglio al plasma 59
2.2.1 Bilancio energetico 60
2.2.2 Descrizione del funzionamento del catodo 63
2.2.3 Erosione del catodo 66

2.2.4 Fenomeno del doppio arco 72
2.3 Qualità del taglio 75
2.3.1 Normativa ISO 9013 - Nomenclatura 75
2.3.2 Determinazione della qualità della superficie di taglio 80

3 Descrizione del sistema di taglio utilizzato 85
3.1 Descrizione della macchina 85
3.2 Plasma interface (Emsis) 100
3.3 CutExpert (Eurosoft) 103

4 Ottimizzazione dei parametri di taglio 107
4.1 Tabelle parametri di taglio e componenti della torcia 108
4.2 Velocità di taglio 112
4.3 Gas di plasma e protezione 114
4.4 Altri parametri per ottimizzare il taglio al plasma 116
4.4.1 Durata dei consumabili 116
4.4.2 Angoli di taglio 117

5 Valutazione economica di un sistema per il taglio al plasma 121
5.1 Analisi dei tempi 122
5.2 Analisi dei costi 129

6 Conclusione 137

1 Cenni teorici sulla fisica dei plasmi

Prima di trattare le leggi della fisica che regolano macroscopicamente il comportamento dei plasmi occorre, innanzitutto, enunciare e analizzare le leggi che li descrivono a livello microscopico. Per onor di completezza verranno anzitutto enunciati gli operatori principali e i 5 postulati alla base della meccanica quantistica, in modo da poter avere le basi fisiche e matematiche per le analisi successive.

1.1 Evoluzione della teoria degli spettri atomici

Gli scienziati nel XIX secolo avevano notato che sia quando la materia si trova ad elevata temperatura sia in presenza di una scarica elettrica, gli atomi emettevano luce di una determinata frequenza. Ciascun atomo ha il suo caratteristico spettro. Nel 1885 Balmer propose una prima legge per descrivere le linee spettrali nella regione del visibile, secondo l'equazione:

$$\lambda = B\frac{m^2}{m^2-4}$$

Dove:

- λ è la lunghezza d'onda;
- B è il limite di Balmer che corrisponde a $3645,6$Å
- m è un numero intero con $m > 2$

In seguito, tale espressione venne generalizzata e modificata da Rydberg in modo da tener conto delle transizioni possibili dell'atomo di idrogeno, ottenendo l'espressione:

$$\widetilde{\nu} = R_h\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

Dove:

- ν è la frequenza e $\widetilde{\nu} = \frac{\nu}{c}$;
- R_h è la costante di Rydberg per l'idrogeno $R_h = 1.097x10^5 cm^{-1}$
- m e n sono numeri interi con $m > n$

Considerando $n = 2$ si può dimostrare che essa diventa la serie di Balmer.
Data la loro importanza, le prime quattro serie sono identificate come:

NOME	n	m
Lyman	1	2,3,4...
Balmer	2	3,4,5...
Pachen	3	4,5,6...
Bracket	4	5,6,7...

In seguito agli studi di Rydberg, Bohr propose una semplice spiegazione dello spettro di idrogeno, partendo dal principio di equilibrio esistente tra la forza centrifuga dovuta alla rotazione degli elettroni attorno al nucleo e la forza di Coulomb, ottenendo:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$$

Dal punto di vista della fisica classica, poiché l'elettrone si trova in una condizione di accelerazione costante, esso dovrebbe emettere radiazioni elettromagnetiche e perdere energia.

Allora Bohr fece l'ipotesi che nello stato stazionario l'elettrone avesse un momento angolare quantizzato pari a:

$$L = n\hbar$$

in cui:

- $\hbar$ corrisponde alla costante di Planck ridotta, ovvero $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ avendo $h = 6.6x10^{-34} Ws^2$;
- n è un numero intero $n = 1, 2, 3...$

L'espressione del momento angolare in meccanica classica per un moto circolare è:

$$L = m_e v r$$

Dunque, eguagliando le due espressioni si ottiene:

$$m_e v r = n\hbar \longrightarrow v^2 = \frac{n^2\hbar^2}{m_e^2 r^2} \qquad (A)$$

Sostituendo nell'equazione di equlibrio sopra enunciata si ottiene:

$$r = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2} n^2$$

Secondo questa espressione ricavata da Bohr, i raggi delle orbite degli elettroni risultano quantizzate, e l'orbita più piccola ottenuta per il valore di $n = 1$, ha un raggio pari a $r = 0.5292$Å; Esso si definisce stato fondamentale (*ground state*).

L'energia totale dell'elettrone in queste condizioni è data dalla differenza tra l'energia cinetica E_K e l'energia potenziale elettrostatica V_P:

$$E_{tot} = E_K - V_P$$

Sostituendo le espressioni:

$$E_{tot} = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Sostituendo il termine v^2 ricavato precedentemente nell'equazione (A) si ottiene l'espressione:

$$E_{tot} = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} \qquad (B)$$

con $n = 1$ si determina l'energia dello stato fondamentale, mentre per $n > 1$ si definisce l'energia degli stati eccitati.

Se un elettrone che appartiene ad un livello di energia più elevato, definito E_s, passa ad un livello inferiore, definito E_i, tale transizione comporterà l'emissione di un fotone di energia pari a $h\nu$ secondo la legge:

$$E_s - E_i = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Sostituendo la relazione dell'energia (B) sopra ricavata si ottiene che:

$$E_s - E_i = h\nu = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2}\left(\frac{1}{n_s} - \frac{1}{n_i}\right)$$

Dove:

- n_s è il numero associato allo stato iniziale;
- n_i è il numero associato allo stato finale.

Èpossibile estendere la validità dell'espressione introducendo il valore Z, il quale rappresenta il numero di protoni nel nucleo, ottenendo per $Z = 1$ l'atomo di idrogeno, per $Z = 2$ l'atomo di elio in seguito ad una sola ionizzazione, $Z = 3$ l'atomo di litio in seguito ad una doppia ionizzazione. Riscrivendo l'espressione precedente avremo:

$$E_s - E_i = \frac{Z^2 m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2}\left(\frac{1}{n_s} - \frac{1}{n_i}\right)$$

Questa teoria presenta dei limiti notevoli poiché non può essere estesa a sistemi con 2 elettroni, non spiega lo spettro in presenza di un campo magnetico applicato e non fornisce informazioni sull'intensità delle linee spettrali.

1.2 Introduzione alla meccanica quantistica

In meccanica quantistica, si definiscono osservabili tutte le variabili dinamiche che possono essere misurate. Una differenza sostanziale tra la meccanica classica e quella quantistica e che nella prima gli osservabili sono rappresentati da una funzione ($x = x(t)$) nella seconda sono da un operatore Γ. L' operatore, quindi, agisce su una funzione $f(x)$ e ne genera un'altra $g(x)$.

Esso si definisce lineare se:

$$\Gamma(af + bg) = a\Gamma f + b\Gamma g$$

Per ogni operatore Γ è possibile identificare una funzione per la quale vale:

$$\Gamma g(x_i) = ag(x_i)$$

con:

- a è una costante.

in questo caso $g(x_i)$ è definita *autofunzione* di Γ e la costante a è definita *autovalore* di $g(x_i)$.

Un altro teorema importante è il teorema di espansione per il quale è possibile esprimere una funzione $g(x)$ come sommatoria di un coefficiente, definito *coefficiente di espansione* moltiplicato per una funzione $f_n(x)$, quindi:

$$g(x) = c_n f_n(x)$$

Utilizzando il concetto di operatore al posto di quello di funzione è necessario introdurre il concetto di prodotto di due operatori poiché, definiti Γ e Ω due operatori diversi avremo che:

$$\Gamma\Omega \neq \Omega\Gamma$$

Dunque, risulterà utile introdurre un ulteriore operatore che fornisca l'informazione della variazione tra i due prodotti. Tale operatore prende il nome di *commutatore* ed è definito come:

$$[\Gamma, \Omega] = \Gamma\Omega - \Omega\Gamma$$

Nel caso in cui avessimo $[\Gamma, \Omega] = 0$ significa che i due operatori *commutano*.

È spesso necessario in meccanica quantistica lavorare con integrali della forma:

$$H = \int f^*(x)\Gamma g(x)dx$$

con $f^*(x)$ la coniugata complessa di $f(x)$.

Oppure nel caso tridimensionale:

$$H = \int f^*(r) \Gamma g(r) d\tau$$

con $\tau = dxdydz$.

ll prodotto scalare è definito come:

$$H = \int f^*(x) g(x) dx$$

quindi quando $H = 0$ significa che le due funzioni sono *ortogonali*, e più in particolare se $g = f$ e se si ottiene:

$$H = \int f^*(x) f(x) dx = 1$$

la funzione $f(x)$ si definisce *normalizzata*.

Se $f(x)$ non è normalizzata, quindi se $H = \int f^*(x) f(x) dx \neq 1$, è sempre possibile normalizzarla moltiplicando per una costante k definito *Coefficiente di normalizzazione*:

$$g(x) = k f(x)$$

in modo tale che:

$$\int g^*(x) g(x) dx = 1 \longrightarrow |k^2| \int f^*(x) f(x) dx$$

potendo ricavare il valore di k dall'ultima espressione.

Dato l'elevato numero di integrali che appesantivano notevolmente la notazione e la scrittura delle espressioni, il fisico Paul Dirac introdusse una scrittura semplificata per descrivere queste operazioni che prende il nome di notazione *bracket*. Questa forma compatta è espressa in questo modo.

$$< g|\Gamma|f >= \int g^*(x) \Gamma f(x) dx$$

$$< f|g >= \int f^*(x) g(x) dx$$

$$\Gamma|f >= a|f > \longrightarrow \Gamma f(x) = a f(x)$$

In tali espressioni il termine $|g >$ si definisce *ket* e corrisponde alla funzione g, mentre il simbolo $< f|$ si definisce *bra* e corrisponde alla coniugata complessa della funzione f, da qui

il nome di notazione *bracket*.

È possibile riassumere alcune proprietà elencate precedentemente in questa notazione:

- $< f|f >= 1$ indica l'integrale di normalizzazione;
- $< f|g >= 0$ con $g \neq f$ indica la condizione di ortonormalità;
- $< f|g >=< g|f >^*$ si definisce *Bracket di Dirac*.

Operatori fondamentali per la meccanica quantistica, sono gli operatori che soddisfano la seguente relazione:

$$\int f^*(x)\Gamma g(x)dx = \left[\int g^*(x)\Gamma f(x)\right]^*$$

Utilizzando la notazione di Dirac:

$$< m|\Gamma|n >= (< n|\Gamma|m >)^*$$

Tali operatori prendono il nome di operatori *Hermitiani* o operatori di *Hermite*.

Gli operatori Hermitiani hanno due caratteristiche che non verranno qui dimostrate e sono:

1. Gli autovalori degli operatori Hermitiani sono reali.
   Considerando un operatore Hermitiano Γ si ha la relazione:

   $$\Gamma f(x) = kf(x) \qquad con \;\; k \in \mathbb{R}$$

2. Le autofunzioni corrispondenti a diversi autovalori di un operatore Hermitiano sono ortogonali.
   Date due funzioni f e g e un operatore Hermitiano Γ si ha che:

   $$\Gamma|f >= k|f >$$

   $$\Gamma|g >= m|g >$$

   con $a \neq b$ allora:

   $$< f|g >= 0$$

1.3 Postulati della meccanica quantistica

Le basi della meccanica quantistica sono fondate su 5 postulati che non possono essere dimostrati ma che per il momento non sono ancora stati smentiti dai dati sperimentali.

1. **Primo postulato**

   Lo stato di un sistema è completamente definito da una funzione $\psi(r_1, r_2, r_3, ..., r_n, t)$; la quale prende il nome di funzione d'onda e che dipende dalle coordinate di tutte le particelle e dal tempo. Tutte le informazioni del sistema possono essere derivate da ψ

2. **Secondo postulato**

   Tutti gli osservabili in meccanica classica corrispondono a operatori Hermitiani in meccanica quantistica.
   Si definisce la *rappresentazione della posizione* come:
   $\hat{x} \longleftrightarrow x\cdot$
   $\hat{p}_x \longrightarrow -i\hbar\dfrac{\partial}{\partial x} \quad da \quad cui \quad \hat{p}_x \longrightarrow -i\hbar\nabla$

   È possibile ottenere altri operatori corrispondenti alle osservabili della meccanica classica prendendo le espressioni e sostituendo x e p con gli operatori della meccanica quantistica.

   $$T = \frac{1}{2}mv_x^2 = \frac{p_x^2}{2m}$$

   $$\hat{T} = -\frac{\hbar}{2m}\frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

   In 3 dimensioni:
   $\hat{T} = -\frac{\hbar}{2m}\nabla^2 = -\frac{\hbar}{2m}\triangle$
   L'energia potenziale in una dimensione è funzione di x, l'operatore è:
   $\hat{V} = V(x)\cdot$
   L'operatore corrispondente all'energia totale è chiamato Hamiltoniano e corrisponde a:
   $\hat{H} = \hat{T} + \hat{V} = -\frac{\hbar}{2m}\nabla^2 - V(x)\cdot$

3. **Terzo postulato**

   Quando un sistema è descritto da una funzione d'onda ψ, il valore medio dell'osservabile A è dato da una serie di "valori attesi" dell'operatore definito come:

   $$< A >= \frac{\int \psi^* \hat{A}\psi d\tau}{\int \psi^* \psi d\tau} = \frac{< \psi|\hat{A}|\psi >}{< \psi|\psi >}$$

Nel caso in cui ψ sia normalizzato e quindi $<\psi|\psi>=1$ si ottiene:

$$<A>=\frac{\int \psi^* \hat{A}\psi d\tau}{\int \psi^* \psi d\tau}=\frac{<\psi|\hat{A}|\psi>}{<\psi|\psi>}=<\psi|\hat{A}|\psi>$$

È dimostrabile che, la misura dell'osservabile A fornisce sempre lo stesso risultato che corrisponde all'autovalore "k".

Nel caso in cui, invece, ψ non fosse autofunzione dell'operatore $\hat{A}$, la misura restituirà come risultato un autovalore di $\hat{A}$, e la probabilità che un certo autovalore a_n sarà uguale a $|c^2|$, dove c il di espansione di ψ.

4. **Quarto postulato**

   La probabilità di trovare una particella decritta da ψ in un volume infinitesimo $d\tau$ in un raggio r è proporzionale a $|\psi(r)^2|d\tau$, dove $|\psi(r)^2|$ corrisponde alla densità di probabilità. Il vantaggio di usare $|\psi(r)^2|$ la densità di probabilità è che esso è reale e sempre positivo.

   $$\int |\psi(r)^2| d\tau = 1$$

   È possibile ricavare alcune proprietà della funzione d'onda ψ:

   - è integrabile due volte, quindi è di classe L^2;
   - non può andare all'infinito in una regione di spazio finita;
   - non ci possono essere due probabilità per lo stesso punto dello spazio; dunque ψ non può avere due soluzioni.
   - ψ deve essere due volte derivabile e la derivata prima, quindi, dovrebbe essere continua.

5. **Quinto postulato**

   La funzione d'onda evolve nel tempo secondo la seguente legge:

   $$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}=\hat{H}\psi$$

   Essa prende il nome di equazione di $Schrödinger$

1.4 Teoria microscopica

Risolvendo l'equazione di $Schrödinger$ in coordinate sferiche (r,θ,ϕ):

$$\frac{\partial \psi^2}{\partial r^2} + \frac{2\partial \psi}{r\partial r} - \frac{1}{r^2}\left[\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\psi}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2\theta}{\partial\phi^2}\right] + \frac{8\pi^2 m_e}{h^e}\left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}\right)\Psi$$

e riducendola ad un'equazione differenziale a variabili separabili è possibile trovare che le soluzioni sono:

- il contributo di ϕ fornisce il numero "l":

$$0 \leq l \leq n-1$$

- il contributo di θ fornisce il numero "m":

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, ..., \pm l$$

Dunque le soluzioni delle equazioni sono dipendenti da tre numeri n, l, m, che sono autofunzione per quanto riguarda l'atomo di idrogeno.

Questi tre valori prendono il nome di *numeri quantici*. Per definire completamente lo stato quantico di un atomo è necessario un quarto valore, lo spin dell'elettrone s, poiché per il principio di esclusione di Pauli non possono esistere due stati di due elettroni identici in un atomo, dunque nel caso in cui si avessero n, l, m uguali si dovrà per forza avere due valori differenti di s.
Esso può assumere due valori distinti:

$$s = \pm\frac{1}{2}$$

I numeri quantici sono:

- "n" Numero quantico Principale, il quale descrive lo stato energetico dell'atomo;
- "l" Numero quantico del momento angolare, il quale descrive la forma dell'orbita elettronica;
- "m" Numero magnetico, il quale descrive l'orientazione dell'orbita elettronica;
- "s" Numero di spin, il quale descrive la rotazione dell'elettrone.

La densità di probabilità di trovare un elettrone, considerando la sola dipendenza da r, in una data regione è data da $P = 4\pi r^2 R^2$. In figura è possibile vedere diverse distribuzioni di densità di probabilità ottenute per diverse combinazioni di n e l nel caso di un elettrone in un atomo di idrogeno

Le funzioni d'onda mono elettroniche si definiscono *orbitali atomici* e in base al valore di "l" vengono attribuite delle lettere sostitutive del valore, ovvero:

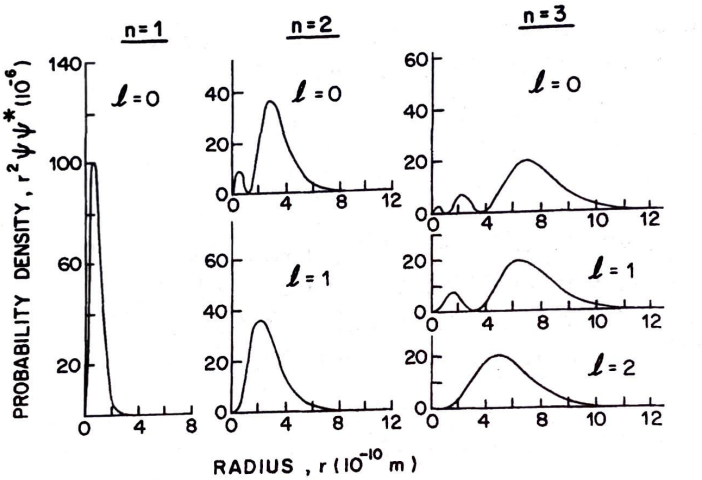


Figure 1.1: Distribuzioni di densità di probabilità nel caso di un elettrone in un atomo di idrogeno.[3]

- $l = 0$ Orbitale s (*sharp series*);
- $l = 1$ Orbitale p (*principal series*);
- $l = 2$ Orbitale d (*diffuse series*);
- $l = 3$ Orbitale f (*Bergmann series*);
- $l = 4$ Orbitale g, e poi si segue l'alfabeto.

Tramite essi è possibile definire lo stato quantico di un atomo e scriverne la configurazione elettronica.

Occorre tenere presente che l'aspetto di maggior rilievo nello studio dei plasmi a livello microscopico risiede nel fatto che il comportamento atomico e elettronico fornisce numerose informazioni sullo stato energetico e sulle transizioni che avvengono al suo interno attraverso l'analisi dello spettro.

Come visto in precedenza, quando un elettrone passa da uno stato energetico più basso ad uno più alto è possibile in seguito all'assorbimento di energia, viceversa, quando esso passa da uno stato energetico superiore ad uno inferiore, tale azione comporta la perdita di energia che avviene tramite l'emissione di un fotone di energia, e dunque di lunghezza d'onda ben definiti, secondo la legge:

$$E_s - E_i = h\nu$$

Occorre tener presente che solo il passaggio tra determinati livelli di energia è permesso. Lo stato energetico che possiede il valore energetico più basso prende il nome di *stato fondamen-*

tale, mentre tutti gli altri si definiscono *stati eccitati*. La durata di appartenenza ad uno stato eccitato normale è di circa $10^{-7}s$, mentre la vita media in uno stato eccitato di risonanza (stato eccitato particolarmente instabile) è di $10^{-8}s$. Esiste, inoltre, la possibilità vengano violate le leggi della transizione creando uno "stato metastabile" fortemente instabile.

Gli elettroni di maggior interesse sono quelli situati nel guscio esterno.

Naturalmente, all'interno di un atomo gli elettroni interagiscono gli uni con gli altri tramite:

- elettrostatiche
- magnetiche;
- quanto-meccaniche.

Tali interazioni determinano la probabilità di una transizione tra un livello ed un altro.

Per gli atomi leggeri per ($Z \leq 30$), gli spin degli elettroni s_i interagiscono tra loro formando il *momento angolare totale di spin* S. Analogamente succede con i momenti angolari orbitali l_i, formando il *Momento Angolare totale orbitale* L. L'interazione tra L-S è definito Russell-Saunders Coupling.

La loro combinazione forma il momento angolare J:

$$J = L + S \quad dove \quad L = \sum l_i \quad , \quad S = \sum s_i$$

Questa è un'approssimazione efficace in presenza di campi magnetici esterni deboli.
E' possibile riportare gli stati energetici in diagrammi in funzione del livello di energia come si puo vedere in figura 1.2, in cui si ha che:

1. Le lettere maiuscole (S,P,D,F,G,...) si riferiscono rispettivamente ai valori $L = 0, 1, 2, 3, 4, ...$
2. Il numero in alto a sinistra è definito molteplicità ed equivale a $2S + 1$
3. Il valore in basso a destra corrisponde al livello ed è indicato con la lettera J e corrisponde a $J = L \pm S$

Diagrammando diversi stati energetici è possibile vedere graficamente tutte le possibili transizioni permesse.

Per atomi più pesanti ciascun momento angolare orbitale tende a combinarsi con il corrispondente Momento Angolare di Spin dando origine a un *Momento angolare totale individuale*.

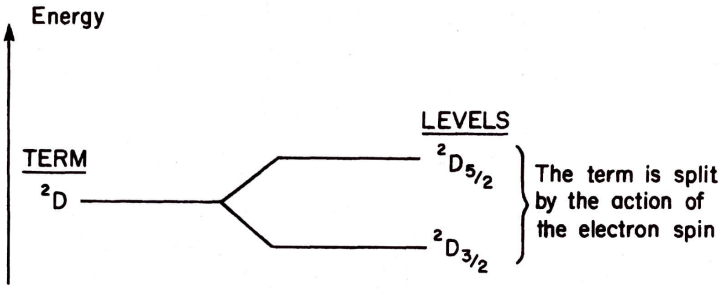


Figure 1.2: Casi possibili di livelli nel caso ^2D dovuti allo spin dell'elettrone [3]

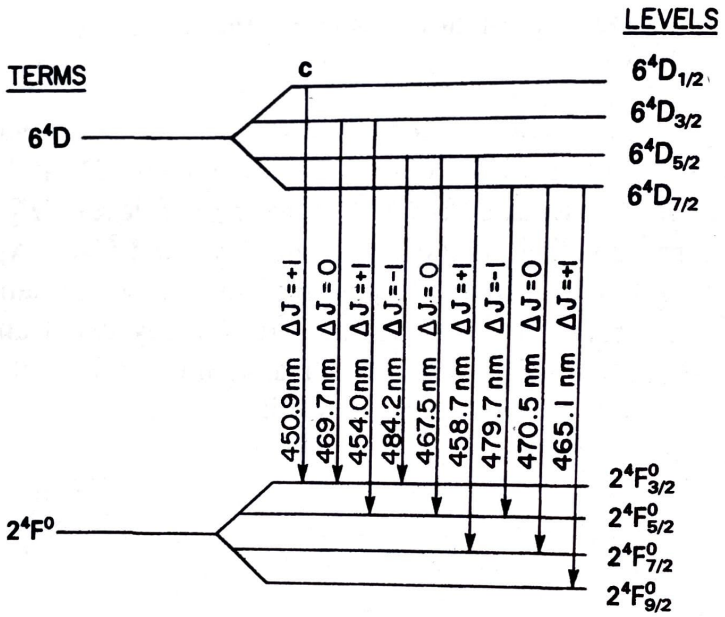


Figure 1.3: Esempio di transizione nello spettro del Rame in un sistema-quartetto [3]

$$J = \sum j_i = \sum (l_i + s_i)$$

Passando dal L-S Coupling al j-j Coupling.

La trattazione diventa più complessa nel caso di molecole composte da più di un atomo, poiché le interazioni tra i due atomi di una molecola biatomica influenzano notevolmente la trattazione e non possono più essere trascurate, al contrario diventano fondamentali. In questo caso le forze elettrostatiche variano con il raggio e una delle approssimazioni di questo fenomeno è il *potenziale di Morse*, che è uguale a:

$$V(r) = D_e\{1 - e^{[-k(r-r_e)]}\}^2$$

dove:

- k è una costante;
- D_e è la differenza tra l'energia dei nuclei nella posizione di equilibrio e quella degli atomi liberi.

In figura 1.4 è possibile vedere l'andamento del potenziale di Morse di una molecola biatomica nel caso di stato fondamentale e in quello eccitato.

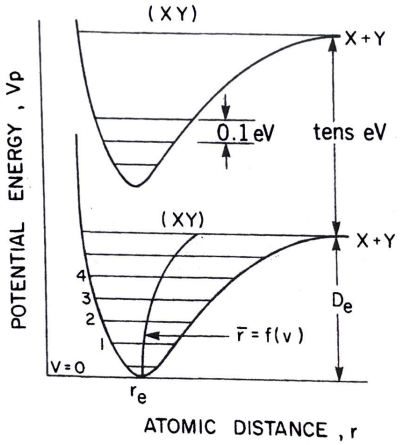


Figure 1.4: Andamento potenziale di Morse per una molecola biatomica nel caso fondamentale e in uno stato elettronicamente eccitato[3]

Dunque, in questa trattazione è necessario considerare i contributi elettronici, vibrazionali e rotazionali degli atomi; per quanto riguarda la soluzione dell'equazione d'onda le cose si

complicano notevolmente. Il caso più semplice si verifica considerando i metodi di eccitazione sopra citati indipendenti (approssimazione di Born-Oppenheimer) e un potenziale di Morse. Tali ipotesi conducono all'espressione:

$$E = E_e + \frac{ha}{\pi}\sqrt{\frac{D_e}{2\mu}}(v+\frac{1}{2}) + \frac{h^2}{8\pi^2\mu r_e^2}J(J+1)$$

Il primo termine esprime l'influenza dell'energia elettronica, il secondo di quella vibrazionale e il terzo di quella rotazionale.

Ampliando lo studio è possibile distinguere all'interno di un plasma le seguenti specie chimiche:

1. Atomi e molecole allo stato fondamentale;
2. Elettroni liberi;
3. Atomi e molecole in uno stato eccitato;
4. Ioni positivi o ioni molecolari;
5. Ioni negativi;
6. Fotoni.

Dal momento che le particelle sopra elencate non sono isolate le une rispetto alle altre, bisogna considerare che gli scambi di energia tra esse non si limitano solamente a quelli di natura energetica affrontati precedentemente, ma intervengono anche quelli dovuti ad interazioni meccaniche tra esse, come per esempio gli urti.

Si introduce allora il concetto di *cammino libero medio*, ovvero la distanza media percorsa da una particella tra due urti consecutivi, e si esprime come:

$$\lambda = \frac{1}{N\pi d^2}$$

Il denominatore corrisponde agli urti per unità di lunghezza e dove:

- N è il numero di molecole per unità di volume;
- d è la distanza tra la traiettoria di una particella e un'altra.

Nel caso analizzato sopra non si tiene in considerazione il comportamento delle molecole in seguito all'urto, e si può tener conto di tale fenomeno considerando una distribuzione di Maxwell delle velocità (distribuzione fondamentale nello studio dei plasmi come si vedrà in seguito), ottenendo:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}N\pi d^2}$$

È possibile notare come esso sia inversamente dipendente dalla pressione interna del plasma poiché la pressione è proporzionale al numero di molecole per unità di volume.

Le molecole possono interagire meccanicamente in due modi differenti, con urti elastici o anelastici.

Gli urti elastici hanno effetti meno sensibili dal punto di vista energetico rispetto ai secondi.

Gli urti anelastici, invece, sono fondamentali poiché durante le collisioni una parte di energia cinetica e di quella interna delle particelle collidenti si trasforma in altri tipi di energia, come per esempio quella chimica.

I fenomeni generati da tali collisioni sono i seguenti:

1. *Eccitazione da fotone*

   L'eccitazione tramite l'interazione con un fotone può essere espressa dalla relazione:

   $$X + h\nu \longrightarrow X^*$$

   dove X indica la molecola nello stato fondamentale, $h\nu$ come visto precedentemente corrisponde all'energia del fotone incidente e X^* indica la molecola nel suo stato eccitato.

2. *Eccitazione dovuto all'impatto con un elettrone*

   Quando avviene un urto con un elettrone c'è un trasferimento di energia proporzionale alla variazione di energia cinetica e nel caso in cui tale energia scambiata sia uguale o maggiore di minima per la transizione tra uno stato più basso e uno più alto si verifica che:

   $$X + e(E_1) \longrightarrow X^* + e(E_2)$$

   con $E_1 - E_2 > E^*$.

3. *Eccitazione per l'impatto con un atomo o uno ione*

   Esiste la possibilità che un atomo venga eccitato tramite l'urto con un altro atomo o con uno ione più veloce, ma le energie in gioco sono troppo basse e quindi tale fenomeno non è di grande importanza nella trattazione dei plasmi termici.

4. *Ionizzazione da fotoni*

   Quando un elettrone di energia $h\nu$ interagisce con un atomo già eccitato X^* è possibile che si generi uno ione con il rilascio di un elettrone, in altri termini:

   $$h\nu + X^* \longrightarrow X^+ + e$$

   Naturalmente l'energia del fotone incidente deve essere superiore alla differenza tra l'energia di prima ionizzazione dell'atomo (energia necessaria per prelevare un elettrone e dunque per vincere l'energia che lo lega all'atomo) e quella dell'atomo eccitato; in altre parole esso deve possedere energia sufficiente per colmare il gap energetico tra l'energia posseduta e quella di 1^a ionizzazione $\longrightarrow h\nu \geq E_1 - E^*$

5. *Ionizzazione per urto con un elettrone*

   Quando un atomo che si trova nel suo stato fondamentale viene urtato da un elettrone, il quale possiede energia sufficiente è possibile che si verifichi:

   $$X + e(E_1) \longrightarrow X^+ + e(E_2) + e \quad dove \quad E_I < E(1)$$

   Dunque, in seguito all'urto, nel caso in cui venga scambiata energia sufficiente, si avrà come risultato uno ione con due elettroni, uno corrisponde a quello incidente, mentre l'altro sarà quello prelevato. Per quanto riguarda una molecola come H_2 si potrà avere due differenti possibilità:

   - La prima possibilità è quella che in seguito all'urto non avvenga la dissociazione della molecola, ottendo:

     $$H_2 + e \longrightarrow H_2^+ + 2e$$

   - La seconda possibilità è che oltre alla ionizzazione avvenga anche la dissociazione, ottenendo:

     $$H_2 + e \longrightarrow H^+ + H + 2e$$

6. *Ionizzazione per urto con atomi o molecole*

Questo fenomeno si verifica nel caso di atomi metastabili, e possono accadere due situazioni differenti, di cui la prima meno probabile della seconda.
Nel primo caso si verifica un'associazione che crea uno ione con rilascio di un elettrone:

$$X + X \longrightarrow X_2^+ + e$$

Nel secondo caso non avviene l'associazione e si ha la creazione di uno ione con perdita di un elettrone limitato ad un atomo.

$$X + X \longrightarrow X^+ + X + e$$

7. *Ionizzazione associativa*

   Questo fenomeno si verifica quando un atomo in uno stato eccitato entra in contatto con un altro generando uno ione e rilasciando un elettrone libero, secondo la:

$$X^* + X \longrightarrow X_2^2 + e$$

8. *Scambio di carica*

   In tale processo non c'è la creazione di elettroni liberi come nei casi precedenti, e si verifica quando uno ione collide con un atomo allo stato fondamentale, e solitamente si verifica quando uno ione accelerato incontra un atomo che si muove a bassa velocità, facendo sì che lo ione torni un atomo allo stato fondamentale, inglobando un elettrone esterno dell'atomo e viceversa l'atomo, che precedentemente si trovava allo stato neutro, perdendo un elettrone si ionizza. Nel caso in cui i due atomi siano uguali si definisce fenomeno di risonanza.

$$X^+ + G \longrightarrow X + G^+$$

9. *Ionizzazione di Penning*

   La ionizzazione di Penning si verifica quando un atomo metastabile entra in relazione con un atomo nel suo stato fondamentale. Rispetto ai casi precedenti, affinché si verifichi questo processo è necessario che l'atomo eccitato possieda un'energia superiore all'energia interna. Questo fenomeno è di particolare interesse nel caso di ionizzazione dovuta ad una scarica elettrica a basse pressioni.

1.5 Distribuzione di Maxwell-Boltzmann

Nello studio dei plasmi occorre utilizzare un concetto più generalizzato di funzione poiché una trattazione di tipo microscopica, quindi riferita ad ogni singola particella, fornirebbe troppe informazioni e sistemi non risolubili per limiti computazionali; quindi, si deve procedere con una descrizione media collettiva del comportamento delle particelle introducendo il concetto di distribuzione.[31]

Considerato un cilindro di gas, l'equilibrio meccanico su due superfici, una posta a quota z e l'altra a quota $z + \Delta z$, si ottiene:

$$pA = (p + \Delta P)A + \varrho A \Delta z g$$

da cui si può ricavare la nota *legge di Stevino*:

$$\Delta P = -\varrho g \Delta z$$

Essa scritta in termini infinitesimi diventa:

$$dP = -\varrho g dz$$

Nell'ipotesi che si tratti di un gas perfetto possiamo avvalerci della legge dei gas perfetti:

$$p = \frac{n}{V} RT \longrightarrow p = \varrho \frac{R}{M} T \longrightarrow \rho = \frac{pM}{RT}$$

Confrontando la legge di Stevino con l'ultima espressione ricavata:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{Mg}{RT} dz$$

Integrando quest'ultima espressione si ottiene l'espressione barometrica:

$$p(z) = p_0 e^{\left(-\frac{Mg}{RT} z\right)}$$

Esprimendo la costante dei gas tramite la costante di Boltzmann $R = k_B N_A$e la costante di Avogadro $m = \frac{M}{N_A}$ (*dove m corrisponde alla massa molecolare*), è possibile riscrivere l'espressione

precedente come:

$$p(z) = p_0 e^{\left(-\frac{mg}{K_B T} z\right)}$$

è possibile riscrivere l'espressione in termini di densità come:

$$\varrho(z) = \varrho_0 e^{\left(-\frac{mg}{K_B T} z\right)}$$

Ipotizzando che la densità di particelle $n(z) \sim \varrho(z)$

$$dN(z) = n(z) A dz \sim n(z) dz$$

Si può notare che nell'espressione dei $\varrho(z)$ compare il termine mgz, il quale corrisponde all'energia potenziale di una molecola di gas a una quota z. L'origine di questa energia è dovuta dall'agitazione termica, poiché essa è immagazzinata grazie all'energia cinetica posseduta dalle stesse; è possibile, quindi, eguagliare queste due grandezze:

$$mgz = \frac{1}{2} m v_z^2$$

tenendo conto che:

$$\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$$

Ora l'espressione barometrica diventa:

$$\varrho(v_z) = \varrho_0 e^{\left(-\frac{m v_z^2}{2 k_B T}\right)}$$

dove il termine $\exp\left(-\frac{m v_z^2}{2 k_B T}\right)$ prende il nome di *fattore di Boltzmann*.

Dato l'elevato numero di particelle bisogna introdurre una funzione di distribuzione, descrivente la probabilità di trovare una molecola ad una quota z $f(z)$ definita come:

$$\frac{dN_z}{N_{tot}} = f(z) dz$$

Dall'uguaglianza tra $E_k = E_P$ si ricava:

$$dz = \frac{v_z dv_z}{g}$$

Introducendo la distribuzione delle velocità lungo z, $f(v_z)$, è possibile procedere con l'approssimazione tra i valori di densità e quelli della distribuzione nel modo seguente:

$$f(v_z)dv_z \sim \varrho(v_z)dv_z$$

Sapendo che:

$$\varrho(v_z) = \varrho_0 e^{\left(-\frac{mv_z^2}{2k_B T}\right)}$$

si ottiene:

$$f(v_z)dv_z = f_0 e^{\left(-\frac{mv_z^2}{2k_B T}\right)}$$

da cui:

$$\int f(v_z)dv_z = \int f_0 e^{\left(-\frac{mv_z^2}{2kBT}\right)}$$

Introducendo il concetto di normalizzazione:

$$\int f(v_z)dv_z = 1$$

E risolvendo l'integrale si ricava il valore della costante f_0

$$f_0 = \sqrt{\frac{m}{2\pi k_B T}}$$

Riscrivendo l'espressione completa si ottiene:

$$f(v_z)dv_z = \sqrt{\frac{m}{2\pi k_B T}} e^{\left(-\frac{mv_z^2}{2k_B T}\right)}$$

Questa espressione corrisponde ad una distribuzione gaussiana di varianza $\sigma^2 = \frac{k_B T}{m}$ nel caso monodimensionale.

É possibile estendere la trattazione al caso tridimensionale considerando il caso isotropo con le velocita lungo x, y, z indipendenti tra di loro.

$$f(\vec{v})d^3\vec{v} = f(v_x)f(v_y)f(v_z)dv_x dv_y dv_z = \left(\frac{m}{2\pi k_B T}\right)^{\frac{3}{2}} e^{\left(-\frac{m(v_x^2+v_y^2+v_z^2)}{2k_B T}\right)} dv_x dv_y dv_z$$

Passando in coordinate sferiche l 'espressione diventa:

$$f(\vec{v})d^3\vec{v} = \left(\frac{m}{2\pi k_B T}\right)^{\frac{3}{2}} e^{\left(-\frac{m(v_x^2+v_y^2+v_z^2)}{2k_B T}\right)} v^2 dv \sin\theta d\theta d\phi$$

Risolvendo l'integrale si ottiene la distribuzione di Maxwell-Boltzmann per le velocità:

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T}\right)^{\frac{3}{2}} 4\pi v^2 e^{\left(-\frac{m(v_x^2+v_y^2+v_z^2)}{2k_B T}\right)}$$

- Velocità più probabile $v_p = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}$
- Velocità media $\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$
- Velocità quadratica media $v_{qm} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$

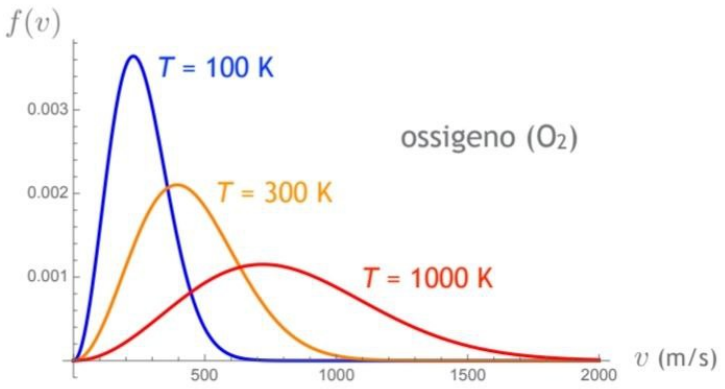


Figure 1.5: Distribuzione di Maxwell-Boltzmann nel caso di O_2 in funzione della T[31]

Come è possibile vedere in figura 1.5 all'aumentare della temperatura le curve si appiattiscono con valore di velocità media crescenti.

Verrà riportata di seguito senza essere dimostrata la distribuzione più generica per la descrizione dei plasmi, che è la distribuzione di *Bose-Einstein*, la quale si applica ad un sistema di bosoni (contrapposta alla distribuzione *Fermi-Dirac*, la quale è valida per i sistemi di fermioni):

$$\frac{N_k^0}{g_k} = \frac{1}{Be^{\beta E_k} - 1}$$

dove:

- N_k^0 numero medio di particelle nello stato k;
- g degenerazione dello stato;
- B termine influenzato dal potenziale chimico;
- β termine influenzato dalla temperatura del sistema, con $\beta = \frac{1}{kT}$ con k costante di Boltzmann
- $E_k$energia del k-esimo stato.

Può essere dimostrato che la distribuzione di Maxwell-Boltzmann può essere ricavata come caso particolare della sopracitata distribuzione di Bose-Einstein, poiché essa è valida per sistemi lineari e isotropi.

Di seguito si riportano le espressioni delle distribuzioni di Maxwell-Boltzmann per le velocità, quantità di moto ed energia. Particolare attenzione merita la distribuzione delle velocità

(sopra dimostrata) poiché essa determina la temperatura di un plasma.

- *Distribuzione di Maxwell-Boltzmann delle velocità*

$$\frac{dN(v)}{N} = \frac{4\pi v^2 dv}{\left(\frac{2\pi kT}{m}\right)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

- *Distribuzione di Maxwell-Boltzmann della quantità di moto*

$$\frac{dN(p)}{N} = \frac{4\pi p^2 dv}{2\pi mkT)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{p^2}{2mkT}}$$

- *Distribuzione di Maxwell-Boltzmann dell'energia*

$$\frac{dN(E)}{N} = \frac{eE^{1/2}dE}{(\pi^{1/2}(kT)^{3/2}} e^{-\frac{E}{kT}}$$

Si definisce la velocità media:

$$\bar{v} = \frac{\int_0^\infty f(v)vdv}{\int_0^\infty f(v)dv}$$

Essendo $v_{max} = \frac{2kT}{m}^{1/2}$ si ottiene:

$$\bar{v} = \left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{1/2}$$

Si definisce la velocità media quadratica:

$$\bar{v^2} = \frac{\int_0^\infty f(v)v^2 dv}{\int_0^\infty f(v)dv} = \frac{3kT}{m}$$

1.6 Funzione di partizione

Per il principio di Aufbau le particelle tendono ad occupare gli orbitali con energia minore prima di quelli ad elevata energia.

Con il crescere della temperatura aumenta la probabilità che gli stati eccitati vengano popolati. Per quantificare questo effetto si ricorre ad una delle espressioni più importanti della meccanica statistica, la quale descrive la probabilità di trovare particelle in un determinato stato. Essa prende il nome di *Fattore di Boltzmann*:

$$p_j \propto e^{-\frac{E_j}{k_B T}}$$

dove:

- p_j è la probabilità che lo stato $'j'$ sia occupato;
- E_j è l'energia dello stato $'j'$;
- k_B è la costante di Boltzmann $k_B = \frac{R}{N_A}$, con N_A il numero di Avogadro;
- T è la temperatura di riferimento espressa in K.

Per una scrittura più compatta l'esponente viene spesso sostituito con il coefficiente β, avendo:

$$\beta = \frac{1}{k_B T}$$

Riscrivendo l'espressione sopra:

$$p_j \propto e^{-\beta E_j}$$

É possibile notare che la probabilità che uno stato a bassa energia venga occupato è molto più elevata rispetto al caso ad elevata energia, poiché all'aumentare di E_j l'esponenziale tende ad azzerarsi e con lui anche la probabilità.

Dal momento che il concetto di energia "assoluta" è un concetto arbitrario, appare molto più conveniente riferirsi alla differenza tra gli stati energetici, ovvero, conviene analizzare la probabilità relativa tra due stati energetici, come:

$$\frac{p_i}{p_j} = \frac{e^{-\frac{E_i}{k_B T}}}{e^{-\frac{E_j}{k_B T}}} = e^{-\frac{E_i - E_j}{k_B T}}$$

Per garantire che la somma di tutti i termini, ovvero che la probabilità totale sia pari a 1,

occorre *normalizzare* l'espressione dividendo per la somma di tutti i termini:

$$p_j = \frac{e^{-\beta E_j}}{\sum_j e^{-\beta E_j}}$$

Il termine di normalizzazione $\sum_j e^{-\beta E_j}$ prende il nome di *Funzione di partizione*.

In molti casi non conviene considerare la somma di tutti gli stati, ma la somma di tutti i livelli di energia che sono in ciascuno stato, quindi si indica la funzione di partizione di degenerazione [1]:

$$\sum_j g_i e^{-\beta E_j}$$

dove:

- g_j indica la degenerazione di ciascun livello.

1.7 Equazione di Saha

L'equazione di Saha descrive lo stato di ionizzazione di un plasma: essa fornisce le relative proporzioni di atomi di una certa specie che si trovano in due differenti stati di ionizzazione.

Considerando la collisione di un elettrone ad alta energia con un atomo neutrale A si ottiene la reazione:

$$e_{fast} + A = A^+ + e_{slow} + e$$

L'energia dell'elettrone liberato può essere scritta come:

[1] Per degenerazione si intende la situazione in cui diversi stati quantici si incontrano allo stesso livello di energia. Se esiste un'energia alla quale corrispondono 3 stati energetici, piuttosto che sommare 3 volte i vari fattori di Boltzmann identici, si preferisce moltiplicare per 3 un solo fattore, con il coefficiente moltiplicativo definito grado di degenerazione. Per esempio considerando l'equazione di Schrodinger in una dimensione

$$-\frac{\hbar}{2m}\frac{d^2\psi}{dx^2} + V\psi = E\psi$$

la quale è un'equazione differenziale del 2° ordine che quindi ha al massimo 2 autofunzioni indipendenti per una data energia, essa potrà al limite avere un grado di degenerazione uguale a 2, mai superiore.

$$E = E_i + \frac{1}{2m}(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)$$

dove il primo termine corrisponde all'energia di ionizzazione e il secondo all'energia cinetica dell'elettrone stesso. Se definiamo uno spazio delle fasi a sei dimensioni $H = dxdydzdp_xdp_ydp_z$ in cui d^6n_e equivale alla densità di elettroni liberati dalla ionizzazione, allora il numero di elettroni sarà dato da:

$$\frac{d^6n_e}{g_k} = \frac{d^6n_e \cdot h^3}{H}$$

Ipotizzando che la distribuzione della quantità di moto di un elettrone sia una distribuzione di Maxwell-Boltzmann:

$$n_e(p)dp = Cp^2 \exp\left(-\frac{p^2}{2mk_BT}\right)dp$$

dove:

- C è una costante ricavata dal rapporto dei coefficienti di ionizzazione ed pari a $C = \frac{n_e 4\pi}{(2\pi m k_B T)^{3/2}}$.

Indicando con n_0 la densità di atomi neutrali allo stato fondamentale, è possibile scrivere il rapporto:

$$\frac{\frac{d^6n_e \cdot h^3}{H}}{n_0} \sim \exp.\left\{-\frac{1}{kT}\left[E_I + \frac{1}{2m_e}(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)\right]\right\}$$

Integrando sul volume e sulle quantità di moto e trascurando gli effetti della degenerazione:

$$\frac{n_e}{n_0} \sim \frac{\Delta V}{h^3}\exp(\frac{-E_I}{kT})\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\exp.\left\{-\frac{1}{kT}\left[\frac{1}{2m_e}(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)\right]\right\}dp_xdp_ydp_z$$

Risolvendo si ottiene che:

$$\frac{n_e}{n_0} \sim \frac{\Delta V(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3}\exp(-E_I/kT)$$

Gli elettroni che derivano dal processo di ionizzazione sono pari agli ioni positivi prodotti;

quindi, ipotizzando che $\Delta V \cdot n_i = 1$, dove n_i corrisponde alla densità di ioni, la formula sopra diventa:

$$\frac{n_e n_i}{n_0} \sim \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \exp(-E_I/kT)$$

Considerando anche il contributo della degenerazione, tralasciata per semplicità nella dimostrazione, è possibile ottenere la formulazione definitiva dell'*equazione di Saha*:

$$\frac{n_e n_{r+1,0}}{n_{r,0}} = \frac{g_e g_{r+1,0}}{g_{r,0}} \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \exp(-E_{r+1}/kT)$$

dove:

- n_e: Densità di elettroni $[m^{-3}]$;
- n_r: Densità degli atomi nello stato di ionizzazione *r*;
- n_{r+1}: Densità degli atomi nello stato di ionizzazione *r+1*;
- g_r: Funzione di partizione di ionizzazione dello stato *r*;
- g_{r+1}: Funzione di partizione di ionizzazione dello stato *r+1*;
- g_e: Peso statistico dell'elettrone che è pari a 2;
- m_e: Massa dell'elettrone;
- E_{r+1}: Energia di ionizzazione dello stato *r+1*;
- T: Temperatura $[K]$;
- h: Costante di Planck;
- k_B= Costante di Boltzmann.

In figura 1.6 è possibile vedere l'andamento del grado di ionizzazione in funzione della temperatura per alcuni gas.

In figura 1.7 è possibile osservare lo stato di ionizzazione di diversi tipi di plasmi.

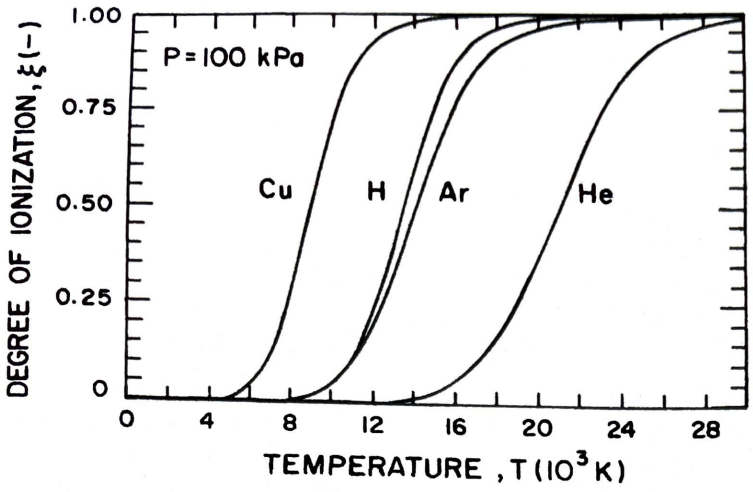


Figure 1.6: Grado di ionizzazione in funzione della T in un dato gas[3]

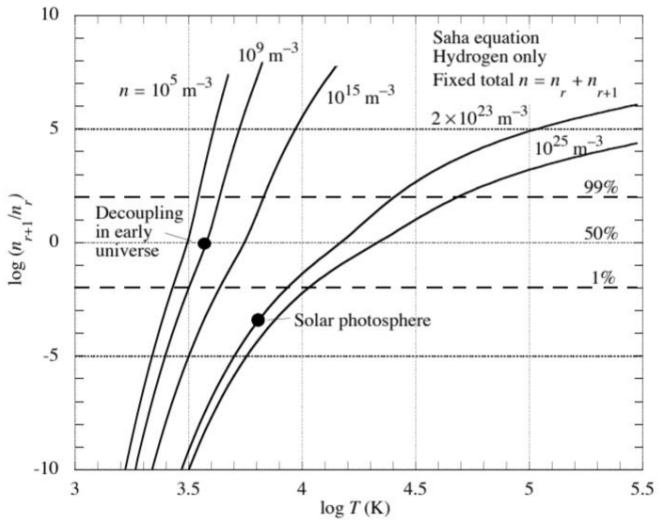


Figure 1.7: Grado di ionizzazione in funzione della T per diversi plasmi[4]

1.8 Grandezze caratteristiche del plasma

Lo stato di plasma viene raggiunto dalla materia quando essa si trova in una condizione di equilibrio termodinamico a $T > 10^4 K$, ovvero in presenza di energia sufficiente da favorire un'elevata ionizzazione; esiste la possibilità di indurre questo stato in sistemi non in equilibrio sfruttando agenti eccitatori con flussi di energie $\geq 10^{-2} eV$. Le particelle cariche libere modificano completamente il comportamento della materia, poiché esse interagiscono con forze a lunga distanza di natura elettromagnetica e oltre alle già presenti forze a bassa distanza tipiche della materia allo stato neutro.
L'agitazione termica e il moto Browniano che dominano le particelle possono essere superati quando il plasma considerato è sufficientemente grande da avere molte interazioni a lunga distanza generando così un *comportamento collettivo*. Oltre agli ioni, all'interno del plasma sono presenti particelle neutrali allo stato fondamentale, particelle eccitate, fotoni, e elettroni; Il requisito fondamentale è che l'insieme di tutte queste specie si bilanci sul piano della carica, generando una condizione neutrale. Questa caratteristica prende il nome di *quasi neutralità*.

1.8.1 Temperatura di un plasma

La temperatura cinetica in un plasma, come in un gas, è definita dall'energia cinetica media delle particelle che lo compongono, secondo la legge:

$$\frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT$$

- m= massa delle particelle;
- $\bar{v}$=velocità effettiva;
- k= costante di Boltzmann
- T è la temperatura assoluta.

L'equazione indicata sopra implica che le particelle seguano una distribuzione di Maxwell-Boltzmann.

La distribuzione di Maxwell-Boltzmann tra le particelle in un plasma o in un gas dipende dalle interazioni tra esse, quindi, dalla frequenza delle collisioni e dall'energia scambiata durante esse. Applicando il principio di conservazione su un urto elastico binario, tra due particelle si

massa m e $m^{'}$, si può vedere che, in media, lo scambio di energia cinetica è dato da:

$$\Delta E_{kin} = \frac{2mm^{'}}{(m+m^{'})^2}$$

Tale espressione implica che per particelle con la stessa massa $m = m^{'}$ si ottiene $\Delta E_{kin} = \frac{1}{2}$, questo comporta che qualunque distorsione della distribuzione di Maxwell-Boltzmann tra particelle della stessa massa venga eliminata dopo meno di 10 collisioni. Queste considerazioni dimostrano che in plasma dominato da collisioni, si può assumere che le collisioni tra le stesse specie pesanti e quelle tra elettroni rappresentino una distribuzione di M-B, e questo permette di definire la corrispondente temperatura tra le specie. Se si indica con il pedice r le diverse specie (elettroni, ioni e particelle neutre) nel plasma, allora la distribuzione per ciascuna di queste specie può essere in termini della sua energia cinetica come:

$$dn_{E_r} = \frac{2n_r}{\sqrt{\pi}}(kT_r)^{-\frac{3}{2}} \exp(-\frac{E_r}{kT_r})dE_r$$

dove:

- T_r rappresenta la temperatura dell' $r-esimo$ componente.

È possibile che le temperature dei vari componenti del plasma possano o meno essere le stesse. Considerando le collisioni tra specie pesanti e elettroni possiamo indicare con $m^{'} = m_e$ la masse degli elettroni, e con $m = m_h$ quella delle specie pesanti ottenendo:

$$\Delta E_{kin} = \frac{2m_e}{m_h}$$

perché $m_e << m_h$. Perciò sono necessarie molte collisioni ($> 10^3$) per eliminare la differenza di energia tra gli elettroni e le specie pesanti. La strada più comune per generare e mantenere un plasma è per mezzo di una scarica elettrica. In tale scarica gli elettroni ad elevata mobilità prendono energia dal campo elettrico applicato e la trasferiscono alle particelle pesanti tramite urti elastici. Ma anche con urti perfetti e un'elevata frequenza di collisione tra elettroni e particelle pesanti, ci sarà sempre una differenza tra la temperatura delle due specie all'interno del plasma.
L'energia trasferita dagli elettroni alle particelle pesanti in un singolo urto elastico può essere espressa come:

$$\frac{3}{2}k(T_e - T_h)\frac{2m_e}{m_h}$$

dove:

- T_e rappresenta la temperatura degli elettroni;

- T_h rappresenta la temperatura delle specie pesanti.

L'energia che un elettrone acquisisce dal campo elettrico attraverso le collisioni è dat da:

$$eE\bar{v_d}\bar{\tau_e}$$

dove:

- $\bar{v_d}$ è la velocità media di deriva;
- τ_e è il tempo medio di volo libero tra le collisioni.

Con $\tau_e = \frac{l_e}{\bar{v_e}}$, con $(\bar{v_e} = \frac{8kT_e}{\pi m_e})^{\frac{1}{2}}$ e con l_e cammino medio libero dell'elettrone, ne consegue che per una situazione di stato stazionario:

$$\frac{T_e - T_h}{T_e} = \frac{3\pi mh}{32m_e}\left(\frac{el_eE}{\frac{3}{2}kT_e}\right)^2$$

In accordo con l'equazione sopra, l'equilibrio cinetico ($T_e = T_h$]) richiede che l'energia acquisita dagli elettroni in un campo elettrico tra le collisioni debba essere molto piccola comparata con l'energia cinetica media degli elettroni. Un'altra interpretazione dell'equazione sopra, considera il fatto che:

$$l_e \sim \frac{1}{p}$$

dove:

- p è la pressione.

quindi:

$$\frac{T_e - T_h}{T_e} = \frac{\Delta T}{T_e} \sim \left(\frac{E}{p}\right)^2$$

Da essa è possibile vedere che il termine $\left(\frac{E}{p}\right)^2$ determina la situazione di equilibrio cinetico in un plasma. Per piccoli valori di $\frac{E}{p}$ la temperatura dell'elettrone si avvicina a quella delle particelle pesanti, ed essa è un requisito per l'esistenza di una LTE (*Equilibrio Termodinamico Locale*) Esistono altre condizioni necessarie per parlare di LTE come per esempio l'equilibrio chimico, ma esse non verranno analizzate. Un plasma che è in equilibrio cinetico e contemporaneamente possiede tutti gli altri requisiti del LTE è classificato come *Thermal plasma*. Al contrario i plasmi che hanno una forte divergenza dall'equilibrio cinetico ($T_e >> T_h$) sono definiti *nonthermal* o *nonequilibrium plasmas*.[3]

1.8.2 Differenti tipi di plasma

Una prima distinzione può essere fatta separando i plasmi naturali da quelli artificiali, dunque creati dall'uomo. Come accennato nell'introduzione i plasmi di origine naturale occupano più del 99% dell'universo conosciuto. Due esempi di plasmi naturali sono rappresentati dei *fulmini* e l*aurora boreale*; essi differiscono per l'elevata pressione del primo e la bassa del secondo, questa è la causa della loro elevata differenza. I plasmi si manifestano su un'ampia scala di pressioni, e possono essere classificati in termini di *temperatura degli elettroni* e *densità degli elettroni.* La figura 1.8 mostra la classificazione tra alcuni plasmi naturali e artificiali. La temperatura nel grafico è espressa in eV ($1eV$ corrisponde a $7740K$ se c'è una distribuzione M-B). In figura 1.8 è possibile vedere la classificazione dei tipi di plasmi in funzione della loro temperatura e densità elettronica.

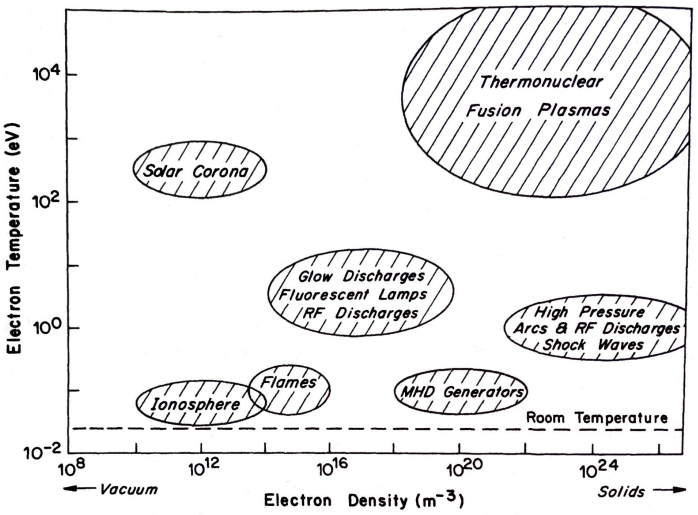


Figure 1.8: Classificazione dei tipi di plasmi [3]

Plasmi estremamente tenui (come, per esempio, la corona solare) può assumere temperature oltre i $10^6 K$, mentre plasmi con densità molto simili a quest'ultimo, come la ionosfera, possono avere temperature di $10^3 K$ o inferiori. Le fiamme, che possono essere classificate come plasmi, mostrano valori di densità elettronica e temperatura abbastanza elevati. Le "glow discharges" (anche definite come scariche auto-sostenute di Townsend), le quali sono plasmi generati da una differenza di potenziale da $100V$ fino ad alcuni kV in un intervallo di pressioni tra i 10^{-4} e $1kPa$, mostrano una temperatura elettronica dell'ordine di $10^{-10} K$. Le condizioni più estreme di densità elettronica e di temperatura si verificano nei plasmi derivanti da fusioni termonucleari dove si raggiungono valori di densità di elettroni di 10^{26} m^{-3} con temperature

che possono arrivare a $10^8 K$. Per i plasmi termici, plasmi che si avvicinano alle condizioni LTE, possiedono temperature di circa $10^4 K$ con densità di elettroni che variano nel range 10^{21} fino a 10^{26} m^{-3} [3]

1.8.3 Lunghezza di Debye

Gli ioni positivi, all'interno di un plasma, sono circondati da una nuvola elettronica, la quale agisce come schermo elettrostatico della carica positiva. La carica netta oltre questa regione di spazio sarà nulla, ovvero al di fuori della nube elettronica si troverà una situazione di neutralità. La sfera che determina il passaggio dalla condizione di neutralità alla condizione di deviazione di carica è nota come *sfera di Debye*.In altri termini è possibile affermare che oltre una certa lunghezza caratteristica λ_D, *lunghezza di Debye*, prevale un campo medio collettivo mentre al di sotto prevalgono gli effetti delle singole cariche.

L'equazione di Poisson per campo elettrico è:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0 \rho_{el}}$$

Ricordando che $\vec{E} = -\nabla V$ e che $\rho_{el} = e(n_i - n_e)$

La carica spaziale può essere espressa come:

$$\rho_{el} = e\left[n_{i,0} - n_{e,0} e^{\frac{eV}{kT_e}} \right]$$

Approssimando l'esponenziale come $\exp \frac{eV}{kT_e} \sim 1 + \frac{eV}{kT}$ è possibile scrivere:

$$\Delta V = \frac{e}{\epsilon_0} n_{e,0} \frac{eV}{kT_e}$$

Indicando con $\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 k_B T}{e^2 n_{e,0}} \right)^{1/2}$ (*lunghezza di Debye*) l'espressione di ΔV precedente come[2]:

$$\Delta V - \frac{1}{\lambda_D} V = 0$$

[2] $\Delta V = \nabla^2 V = \nabla \cdot \nabla V$ indica il Laplaciano della funzione V, che corrisponderebbe alla divergenza del gradiente della funzione. Esso in coordinate cartesiane in uno spazio -n dimensionale corrisponderebbe a$\Delta = \nabla^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$

Riscrivendo l'espressione in coordinate sferiche:

$$\frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r}\frac{dV}{dr} - \frac{1}{\lambda_D^2}V = 0$$

da cui applicando le condizioni al contorno:

1. $V = 0$ per $r \longrightarrow \infty$

2. $V = \frac{e}{4\pi\epsilon_0}$ per $r \longrightarrow 0$

si ottiene:

$$V = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r} e^{-\frac{r}{\lambda_D}}$$

Tale espressione mostra come attorno ad una carica si crei una nuvola di carica che riduce il potenziale elettrico coulombiano fino rendere trascurabile l'effetto della singola carica per distanze superiori a λ_D.In figura 1.6 si può osservare l'andamento del potenziale coulombiano nel caso di schermatura e di assenza del fenomeno. Come precedentemente affermato, oltre tale lunghezza esisterà una prevalenza degli effetti collettivi rispetto a quelli particolari. [3]

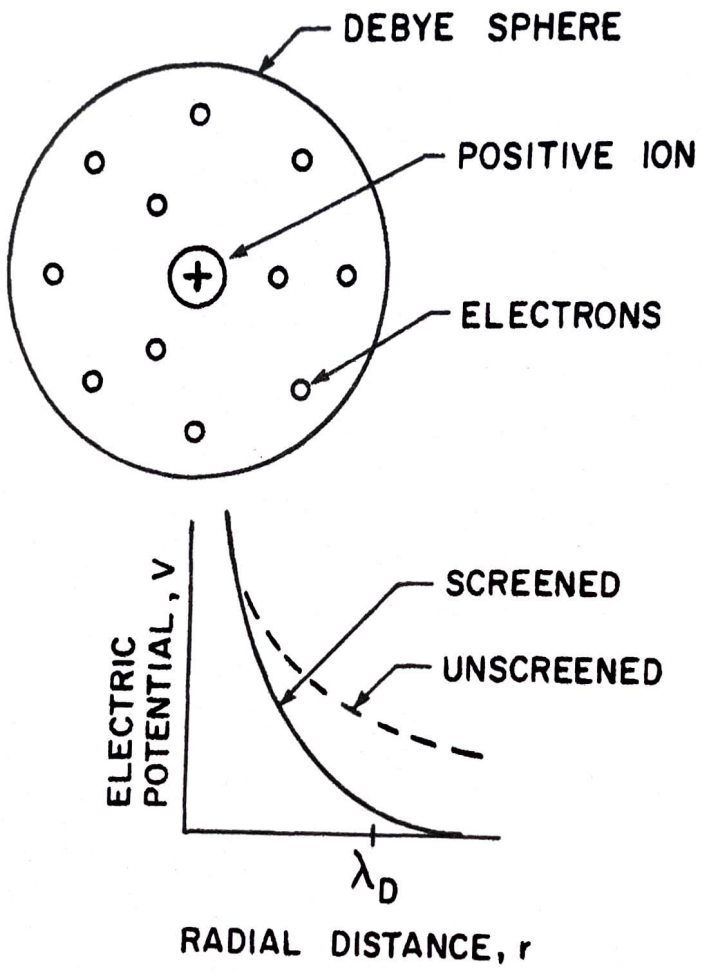


Figure 1.9: Andamento del potenziale coulombiano nel caso di sfera di Debye[3]

1.8.4 Parametro di Landau e Parametro del plasma

Il *parametro di Landau* è la distanza che determina l'equilibrio tra il potenziale elettrostatico e l'energia cinetica tra un ione e un elettrone. Scrivendo l'equazione di equilibrio di questi due termini si ottiene:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{min}} = \frac{3}{2}kT_e$$

da cui è possibile ricavare l'espressione della distanza minima in cui questi due termini si

controbilanciano:

$$r_{min} = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 k T_e}$$

Si può notare che l'unica variabile che determina tale parametro è la temperatura degli elettroni; quindi, nel caso in cui T_e crescesse il raggio minimo necessario a bilanciare il potenziale diminuirebbe, e viceversa.

In un plasma è necessario un numero sufficiente di particelle per parlare di comportamento collettivo e quindi è necessario che:

$$N_D = \frac{4\pi}{3} n \lambda_D^3 \gg 1$$

A tale scopo si introduce la grandezza $\Lambda = 3N_D$ definito *Parametro del plasma.* Quando essa è molto maggiore dell'unità gli effetti collettivi sono dominanti

La distanza media tra le particelle cariche è $d_{par} = n_e^{-1/3}$.

L'ultima lunghezza caratteristica per un plasma è il cammino medio libero il quale per un plasma è dell'ordine dei $10^{-6} m$ [3]

1.8.5 Frequenza del plasma

Considerando il rapporto tra la velocità termica delle cariche e la lunghezza di Debye si ricava una frequenza, definita *Frequenza di plasma.* Essa mette in relazione la carica trasportata e la massa della particelle cariche (rappresentante l'inerzia) e necessaria per definire le varie frequenze di oscillazione (rappresenta un'oscillazione della densità elettronica). L'espressione è:

$$\omega_p = \frac{v}{\lambda_D} = \sqrt{\frac{4\pi p^2 n}{m}}$$

Dove p corrisponde alla carica della particella.
Essendo gli elettroni le particelle più mobili con minor inerzia appare chiaro che la frequenza massima sia la loro e corrisponde a:

$$\omega_e = 5,6 \cdot 10^4 \sqrt{n_e}$$

La frequenza di plasma è anche nota come onde di Langmuir.[8]

1.8.6 Conduttività di un plasma

Il raggiungimento della quasi-neutralità in un plasma è legata alla capacità delle cariche elettriche di rispondere alla presenza di un campo elettrico pure in presenza di collisioni che ne ostacolino il moto. Questa caratteristica è misurata dalla conduttività elettrica σ, definita come il rapporto tra la densità di corrente che si genera e il campo elettrico che la induce[8]:

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$$

Bisogna tener conto che la conduttività è un tensore dal momento che i plasmi sono fortemente anisotropi sotto la spinta di un campo esterno, sebbene in trattazioni notevolmente semplificate esso possa essere ridotto ad uno scalare. Scrivendo la densità di corrente come:

$$j = -nev$$

E ricordando che in questo caso è possibile utilizzare l'uguaglianza:

$$m\frac{dv}{dt} = -eE$$

si può ottenere l'espressione della conduttività come:

$$\sigma = -\frac{j}{\frac{m}{e}\frac{dv}{dt}}$$

Introducendo il concetto di frequenza di collisione ν_c si può riscrivere l'espressione come:

$$\sigma = \frac{ne^2}{m\nu_c}$$

1.8.7 Frequenza di Larmor

Data una particella con carica q di massa m e velocità $\vec{v}$ in presenza di un vettore d'induzione di campo magnetico $\vec{B}$ la forza che agisce sulla particella è data da:

$$\vec{F} = m\frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

Moltiplicando per la velocità v:

$$\frac{d}{dt}(\frac{1}{2}mv^2) = q\vec{v} \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = q(\vec{v} \cdot \vec{v}) \cdots \vec{B} = 0$$

Da quest'ultima espressione si può notare come l'energia cinetica della particella rimanga costante. In generale la velocità è composta da due componenti, una parallela e l'altra perpendicolare al vettore induzione $\vec{B}$:

$$\vec{v} = \vec{v}_{\parallel} + \vec{v}_{\perp}$$

Analizzando la forza secondo le due componenti possiamo scrivere:

$$m\frac{d\vec{v}_{\parallel}}{dt} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

$$m\frac{d\vec{v}_{\perp}}{dt} = q(\vec{v} \times \vec{B}) = 0$$

Considerando il moto circolare di una particella, esso sarà generato dall'equilibrio tra la forza generata dal campo e la forza centrifuga subita dalla particella a causa del moto rotatorio, se non coesistessero queste due forze in equilibrio si avrebbe un fenomeno di deriva; dunque, è possibile scrivere:

$$\frac{m\vec{v}_{\perp}^{\,2}}{r_L} = q(\vec{v}_{\perp} \cdot B)$$

dove r_L è il raggio della circonferenza della particella, definita come *raggio di Larmor*:

$$r = \frac{m\vec{v_\perp}}{qB}$$

La frequenza di rotazione è conosciuta come *frequenza di Larmor o di ciclotrone*:

$$\omega_L = \frac{qB}{m}$$

1.8.8 Velocità di Alfvén

Un altro parametro importante per un plasma è la velocità di Alfvén. Essa corrisponde alla velocità di propagazione di onda di Alvfén all'interno di un plasma (questo è prova che all'interno di un plasma si possono propagare onde di differente natura rispetto alle classiche). La definizione di onda di Alfvén é la seguente: «Dal punto di vista fisico, un'onda di Alfvén è una perturbazione ondulatoria del plasma che si propaga tramite l'oscillazione di ioni all'interno di un campo magnetico. La densità di massa degli ioni è all'origine dell'inerzia, mentre la tensione delle linee del campo magnetico dà luogo alla forza di ripristino. L'onda si propaga in direzione del campo magnetico, sebbene le onde esistano anche con un'incidenza obliqua, trasformandosi però in onde magnetosoniche quando la propagazione è perpendicolare al campo magnetico. Il moto degli ioni e la perturbazione del campo magnetico avvengono nella stessa direzione, mentre risultano trasversali alla direzione di propagazione dell'onda.»[36]

L'espressione della velocità è data da:

$$v_a = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 n_i m_i}}$$

Dove:

- v_a è la velocità di Alfvén;
- μ_0 permeabilità magnetica del plasma;
- B intensità del campo magnetico;
- n_i densità del numero di ioni;
- m_i massa degli ioni.

1.9 Modellizzazione di un plasma

Come precedentemente esposto un plasma è un gas quasi completamente ionizzato composto da particelle cariche (ioni e elettroni) e neutre; questo impone che all'interno del comportamento fisico di un plasma intervengano numerose variabili di diversa natura fisica. La modellizzazione di un plasma in prima analisi potrebbe basarsi su un approccio di natura microscopica, ma come si vedrà in seguito, questo approccio non è fattibile dal punto di vista computazionale, poiché esso si basa sullo studio di ogni singola particella che porta allo sviluppo di un sistema composto da $3N + 10$ incognite (con N che corrisponde al numero di particelle). Un metodo più efficace è quello di utilizzare uno studio di tipo statistico, il quale, sebbene privi esso di parte della sua accuratezza è in grado di fornire risultati ancora estremamente precisi. Un'ulteriore semplificazione è, dunque, quella di far ricorso ad un modello fluido (trattando il plasma come se fosse un fluido a tutti gli effetti), perdendo, però, tutte le informazioni relative alla distribuzione di velocità delle particelle.
A seconda delle esigenze e delle semplificazioni introdotte si sono sviluppati diversi modelli che sono:

- Teoria delle orbite;
- Teoria cinetica;
- Teoria magnetoidrodinamica (MHD).

La prima teoria si utilizza quando è necessario comprendere il comportamento di un plasma in presenza di campi esterni intensi e quando la dinamica interna è regolata da essi. La seconda teoria è quella che fornisce una descrizione più dettagliata coinvolgendo anche situazioni al di fuori dell'equilibrio, ma è notevolmente impegnativa dal punto di vista computazionale. Il terzo approccio consente di descrivere e trattare la maggior parte dei fenomeni in un plasma tralasciando numerose informazioni; essa è applicata particolarmente nello studio dei plasmi astrofisici. Essendo il plasma governato sia da fenomeni di tipo elettromagnetico sia di tipo fluidomeccanico, la trattazione di questo stato della materia necessita di tutti gli strumenti matematici applicabili a questi ambiti, quindi:

1. Equazioni di Maxwell;
2. Equazioni di Navier-Stokes;
3. Equazioni che legano proprietà dinamiche e elettrodinamiche del fluido.

- **Equazioni di Maxwell**

$$\begin{cases} \nabla \cdot E_m(x,t) = 4\pi\rho(x,t) \\ \nabla \cdot B_m(x,t) = 0 \\ \nabla \times E_m(x,t) = -\dfrac{1}{c}\dfrac{\partial}{\partial t}B_m(x,t) \\ \nabla \times B_m(x,t) = \dfrac{4\pi}{c}j_m(x,t) + \dfrac{1}{c}\dfrac{\partial}{\partial t}E_m(x,t) \end{cases} \tag{1.1}$$

- **Equazioni di Navier-Stokes-Fourier**

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\vec{u}) = 0 \\ \dfrac{\partial\rho\vec{u}}{\partial t}\nabla\cdot(\rho\vec{u}\otimes\vec{u}) + \nabla p = \nabla\cdot\vec{\Pi}_v + \rho\vec{a} \\ \dfrac{\partial\rho e_t}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho e_t\vec{u} + p\vec{u}) = \nabla\cdot(-\vec{q_\alpha} + \vec{\Pi}_v\cdot\vec{u}) \end{cases} \tag{1.2}$$

1.9.1 Teoria delle orbite

La teoria delle orbite appartiene solo marginalmente allo studio del plasma, poiché tramite essa ci si limita allo studio del moto di una sola particella in campi esterni assegnati, considerando che il plasma sia dominato prevalentemente dagli effetti collettivi. Generalmente questo studio è sempre accompagnato da quello cinetico del fenomeno.[8] Per poter studiare il moto delle cariche secondo la teoria delle orbite è necessario assumere che i campi elettromagnetici esterni siano dominanti rispetto a quelli interni dovuti alle singole cariche. La legge che descrive la forza interagente su una carica in moto in un campo elettromagnetico è la *forza di Lorentz* espressa come:

$$\vec{F_L} = q(\vec{E} + \vec{v}\times\vec{B})$$

Il moto di una particella sarà composto da due componenti:

1. Moto di rotazione attorno al *centro di guida*;
2. Moto del *centro di guida*.

Per esempio, una particella che si muove con una traiettoria elicoidale sarà composta da una componente di rotazione attorno al centro di guida circolare e da una traslazione rettilinea uniforme.

Moti di deriva

Una particella carica all'interno di un campo magnetico, oltre che da esso, può anche essere influenzata da forze esterne, generando un moto di deriva.
In questo caso il moto della particella è:

$$m\frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{F} + \frac{q}{c}\vec{u} \times \vec{B}$$

Considerando un sistema di riferimento S' definito come $x' = x - \frac{cE}{B}t, y, z$, ovvero un sistema che si muove nella direzione delle x con velocità pari a cE/B.
La velocità di deriva può essere scritta in forma generale come:

$$\vec{u_D} = \frac{c}{q}\frac{\vec{F} \times \vec{B}}{B^2}$$

La velocità $\vec{u_D}$ è il moto del centro di guida e corrisponde al moto di deriva. Nel caso di forza perpendicolare la traiettoria che si creerà sarà una cicloide, il cui verso di deriva, nel caso in cui la forza sia indipendente dalla carica, avverrà in versi opposti a seconda che si tratti di cariche positive o negative.[8]

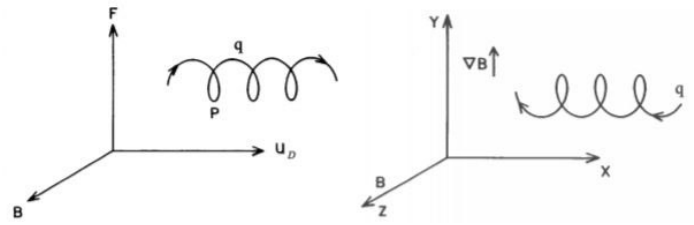


Figure 1.10: Traiettoria di una particella carica positivamente in un campo magnetico uniforme (sinistra). Traiettoria di una particella positiva soggetta a un campo magnetico non uniforme (destra)

Deriva elettrica

Nel caso in cui la forza che agisce sia dovuta ad un campo elettrico $\vec{F} = q\vec{E}$ si può riscrivere la velocità di deriva come:

$$\vec{u_D} = c\frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$$

A differenza del caso precedente in questo il segno non dipende dalla carica. La forza generata che comporterebbe una continua accelerazione lungo la sua direzione è perfettamente compensata dal termine $\frac{e}{c}\vec{v}_E \times B$ e come conseguenza il moto resta confinato in un intervallo finito ed è periodico.[8]

Deriva di gradiente

Questo tipo di deriva si manifesta nel caso in cui il campo magnetico non fosse costante nella regione spaziale di riferimento. Ipotizzando che il vettore induzione magnetica sia descritto dall'espressione $\vec{B} = B_z(y)$ (gradiente nella direzione y).
Nel caso di piccoli gradienti si può considerare:

$$B_z(y) \approx B_0\frac{dB_z}{dy}y$$

la forza di Lorentz locale sarà:

$$F_y = -\frac{q}{c}u_x\left(B_0 + \frac{dB_z}{dy}y\right)$$

In forma vettoriale la forza può essere riscritta come:

$$\langle F \rangle = \pm\frac{q}{2c}u_\perp r_c \nabla B$$

sostituendo nell'espressione della velocità di deriva si trova:

$$\vec{u_D} = \pm\frac{1}{2}u_\perp r_c\frac{\vec{B} \times \nabla B}{B^2}$$

Il ± dipende dal segno della carica, per cui si può generare una corrente in un plasma ionizzato muovendo elettroni e ioni positivi in versi opposti.[8]

Deriva di curvatura

Nel caso in cui il campo magnetico fosse costante in modulo ma le linee di forza avessero un raggio di curvatura costante R_c, le cariche subirebbero una forza centrifuga media pari a:

$$\vec{F_c} = -mu^2 \frac{\vec{R_c}}{R_c^2}$$

Da quest'ultima espressione è possibile ricavare la velocità di deriva:

$$\vec{u_D} = -\frac{cmu^2}{qB^2} \frac{\vec{R_c} \times \vec{B}}{R_c^2}$$

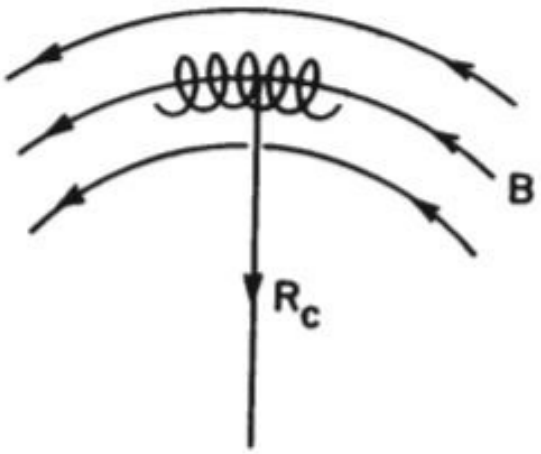


Figure 1.11: Traiettoria di una carica in un campo magnetico a curvatura costante [3]

1.9.2 Teoria cinetica

La teoria cinetica si basa sull'applicazione delle leggi della dinamica dei fluidi a un plasma. Come visto precedentemente il plasma presenta notevoli differenze con un fluido neutro e quindi nella trattazione della sua dinamica bisognerà tenere conto di tutti questi aspetti.

L'equilibrio di una particella nello spazio delle fasi a sei dimensioni è dato dalle coordinate (x, y, z) per la posizione e (v_x, v_y, v_z) per le velocità. Il flusso netto di particelle in un volume $d\vec{r}$ può essere trovato considerando il flusso di ciascuna particella attraverso le sei facce del

volume di riferimento $dxdydz$. Per semplicità si considerano particelle della stessa specie. Le particelle con velocità compresa tra $\vec{v} + d\vec{v}$ che passano attraverso il piano y,z lungo x sono date da:

$$v_x f d\vec{v} dydz$$

Analogamente in una regione posta a $x + dx$ si avrà:

$$v_x f d\vec{v} dydz + \frac{\partial}{\partial x}(v_x f d\vec{v} dydz)dx$$

Il bilancio sulle due superfici sarà quindi:

$$v_x f d\vec{v} dydz - [v_x f d\vec{v} dydz + \frac{\partial}{\partial x}(v_x f d\vec{v} dydz)dx] = -\frac{\partial}{\partial x}(v_x f)d\vec{v} dydzdx$$

Estendendo la trattazione alle sei facce il bilancio di flusso sarà:

$$-\vec{\nabla}_r(\vec{v} \cdot f)d\vec{v} d\vec{r}$$

Un discorso analogo può essere applicato nello spazio delle velocità ai flussi associati all'accelerazione, ottenendo:

$$-\vec{\nabla}_v\left(\frac{\vec{F}}{m} f\right)d\vec{v} d\vec{r}$$

Inoltre, è necessario tener conto della variazione della funzione di distribuzione di densità delle particelle:

$$\frac{\partial f}{\partial t}$$

Considerando C_{ij} come termine descrivente la variazione di particelle nel volume di controllo in seguito alle collisioni tra le particelle di specie i e quelle j, unendo questo termine con i precedenti è possibile scrivere l'equazione per le particelle di una specie, per esempio (i), come:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \vec{\nabla}_r(\vec{v}_i f_i) + \vec{\nabla}_v\left(\frac{\vec{F}_i}{m_i} f_i\right) = \sum^{j} C_{ij}$$

Tale equazione è nota come **Equazione di Boltzmann**. Il termine a sinistra rappresenta gli effetti collettivi, mentre il termine di destra rappresenta i termini collisionali.

Una forma alternativa di scrittura di questa legge prevede la sostituzione del termine collision-

ale con un termine generico $\left(\frac{\partial f_i}{\partial t}\right)_{coll}$, riscrivendola:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \vec{\nabla}_r(\vec{v}_i f_i) + \vec{\nabla}_v\left(\frac{\vec{F}_i}{m_i} f_i\right) = \left(\frac{\partial f_i}{\partial t}\right)_{coll}$$

Il termine collisionale è legato al parametro di plasma N_D.

Nel caso in cui le collisioni fossero trascurabili allora il termine $\left(\frac{\partial f_i}{\partial t}\right)_{coll} = 0$, quindi:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \vec{\nabla}_r(\vec{v}_i f_i) + \vec{\nabla}_v\left(\frac{\vec{F}_i}{m_i} f_i\right) = 0$$

Essa viene definita **Equazione di Vlasov**, ed essa corrisponde all'equazione di Boltzmann nella condizione in cui la frequenza delle collisioni è particolarmente piccola, ovvero, nel caso in cui la lunghezza Debye sia grande poiché $\nu_{coll} = \frac{\omega_p}{4\pi n \lambda_D^3}$..

Tale equazione può essere espressa riferita al numero di particelle, senza l'introduzione del concetto di distribuzione, naturalmente ciò la rende impossibile da risolvere dal momento che sarebbe necessario applicarne una per ogni specie associata alle equazioni di Maxwell, rendendo il sistema non risolubile. Questa forma è definita **Equazione di Klimontovich**.

$$\frac{\partial N_s}{\partial t} + \vec{\nabla}_r(\vec{v}_i N_s) + \vec{\nabla}_v\left(\frac{\vec{F}_i}{m_i} N_s\right) = 0$$

dove N_s corrisponde al numero di particelle della specie S.

Se il plasma è sottoposto solamente a forze di natura elettromagnetica l'equazione di Boltzmann può essere scritta come:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \vec{\nabla}_r(\vec{v}_i f_i) + \frac{\vec{q}_i}{m_i}\left(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B}\right) \cdot \vec{\nabla}_v f_i = \left(\frac{\partial f_i}{\partial t}\right)_{coll}$$

Calcolare il termine collisionale è particolarmente complicato ed esistono diverse formulazioni di questo termine. Nel caso in cui il plasma sia spazialmente omogeneo e non sia sottoposto a nessuna forza esterna, l'equazione di Boltzmann si ridurrebbe alla forma:

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} = \left(\frac{\partial f_s}{\partial t}\right)_{coll}$$

Partendo da queste ipotesi e tralasciando la dimostrazione è possibile giungere alla formu-

lazione del **termine collisionale di Fokker-Planck**:

$$\left(\frac{\partial f_i}{\partial t}\right)_{coll} = -\frac{\partial}{\partial v_i}\left(\frac{\langle \Delta v_i \rangle}{\Delta t} - \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial t}\frac{\langle \Delta v_i \Delta v_j \rangle}{\Delta t} f_s\right) + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial v_i}\left(\frac{\langle \Delta v_i \Delta v_j \rangle}{\Delta t}\frac{\partial f_s}{\partial v_j}\right)$$

Dove il primo termine si riferisce alla variazione di velocità in seguito agli urti, mentre il secondo termine si riferisce al flusso nello spazio delle velocità associato.

1.9.3 Teoria Magnetoidrodinamica (MHD)

Il modello magnetoidrodinamico nasce come caso particolare di quello fluido, poiché essendo quest'ultimo troppo complesso dal punto di vista matematico è stato necessario ricavarne una semplificazione limitando il numero di soluzioni introducendo il concetto di *regime*. In questo modo è possibile considerare solo le soluzioni contenute in un intervallo preciso che si desidera studiare. Per semplificare la trattazione si faranno le seguenti semplificazioni: assenza di separazione di carica, l'unica forza elettromagnetica è dovuta al termine di *Hall* $\vec{j} \times \vec{B}$, si aggiunge all'equazione dell'energia la dissipazione per effetto Joule, la velocità dei processi $\vec{v} \ll c$ cosicché è possibile trascurare le correnti di spostamento. Le equazioni prese in considerazione saranno le equazioni di Navier-Stokes, le equazioni di Maxwell, l'equazione di Ampère e la legge di Ohm.

Il sistema delle equazioni MHD risulterà essere:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \\ \rho \dfrac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{F} - \nabla p + \dfrac{1}{c}\vec{j} \times \vec{B} + \nu \nabla^2 V \\ \rho\left(\dfrac{\partial \epsilon}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \epsilon\right) = \nabla \cdot (K \nabla T) - p \nabla \cdot \vec{v} + \dfrac{j^2}{\sigma} \\ \nabla \times \vec{B} = \dfrac{4\pi}{c}\vec{j} \\ \vec{j} = \sigma\left(\vec{E} + \dfrac{\vec{v}}{c} \times \vec{B}\right) \\ \nabla \times \vec{E} = -\dfrac{1}{c}\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{cases} \tag{1.3}$$

L'equazione del moto nel campo magnetico risulterà essere:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = \vec{F} - \frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{1}{4\pi\rho}(\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} + \nu\nabla^2\vec{v}$$

Il campo magnetico introduce nell'equazione del moto una pressione isotropa e una tensione lungo le linee di forza.

Combinando la legge di Ampère con la legge di Ohm e confrontando il risultato con la legge di Faraday si ottiene:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \eta\nabla^2\vec{B} + \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B})$$

Essa è definita **Equazione magnetoidrodinamica**, dove $\eta = c^2/4\pi\sigma$ *resistività elettrica.* Il primo termine indica la diffusione del campo magnetico mentre il secondo la convezione del campo magnetico da parte del plasma in moto.

Come casi limite dell'equazione magnetoidrodinamica si considerano i casi di:

- Plasma a riposo, $V = 0$;
  In questo caso l'equazione si ricuce alla forma:
  $$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \eta\nabla^2\vec{B}$$
- Plasma in moto con resistività trascurabile $\eta = 0$.
  Mentre in questo si riduce a:
  $$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B})$$

Esistono due teoremi importanti associati a questa teoria.
Il primo afferma che: "il flusso magnetico attraverso qualunque percorso concatenato con il plasma è costante

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot dS = cost$$

cioè il campo è congelato nel plasma."

Il secondo afferma che: "elementi di plasma che si trovano inizialmente associati ad una linea di flusso continuano a rimanere solidali con tale linea durante il moto; qualora aumenti la densità del plasma, cresce anche l'intensità del campo magnetico e viceversa."

Il problema è che spesso la resistività del plasma non è nulla e quindi diventa fondamentale

analizzare quando ciò valga e quando no.

In questo caso bisogna considerare che il termine diffusivo sia più lento rispetto a quello convettivo e quindi che:

$$\nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) \gg \eta \nabla^2 \vec{B} \frac{VB}{L} \gg \eta \frac{B}{L^2} Re_m = \frac{LV}{\eta} \gg 1$$

dove Re_m è il *numero di Reynolds magnetico,* quindi per grandi valori di questo termine la teoria MHD sarà valida.[8]

Magnetoidrostatica

Trascurando gli effetti resistivi e viscosi dall'equazione del moto possiamo ricavare l'equazione:

$$\nabla p = \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B}$$

tale espressione indica che le forze di pressione devono essere bilanciate da sforzi magnetici.

È possibile introdurre un parametro che metta in relazione la pressione del gas e quella magnetica definito $plasma - \beta$:

$$\beta = \frac{p}{\frac{B^2}{8\pi}}$$

Un plasma è spesso instabile, poiché all'interno sono presenti perturbazioni locali che tendono a creare uno squilibrio aumentando l'intensità del campo magnetico locale, determinando una propagazione dell'instabilità. Nel caso di β bassi i campi magnetici non possono essere equilibrati dalla pressione ma devono avere $(\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} = 0$. Tali campi sono definiti *campi force-free.* Essi hanno come soluzione:

$$(\nabla \times \vec{B}) = \mu \vec{B}$$

dove μ è definita costante lineare del campo force-free lineare.[8]

2 Taglio al plasma: cenni teorici

L'avvento dell'utilizzo del plasma nelle lavorazioni meccaniche risale alla metà del XX secolo, in cui esso veniva utilizzato quasi esclusivamente per le saldature, poiché tramite questa tecnologia permetteva di lavorare a temperature e velocità notevolmente più elevate rispetto ai metodi tradizioni, comportando un aumento della produttività. La saldatura al plasma è ottenuta tramite l'utilizzo di una torcia composta all'interno di un elettrodo di tungsteno, il quale non prende parte alla fusione, e un gas plasmogeno, il quale quando attraversato da una scarica elettrica si ionizza quasi completamente generando un fascio di plasma. Per ottenere una saldatura più precisa possibile occorre che il getto sia protetto dall'atmosfera circostante e questo si ottiene utilizzando un gas inerte di protezione del bagno fuso.
La tecnologia del taglio al plasma nasce nel 1955 con il brevetto di Robert Gage come evoluzione della saldatura al plasma. Egli ha come intuizione quella di inserire un ugello semplicemente convergente per creare un getto più sottile aumentando la densità di energia a tal punto da poter tagliare i metalli e più in particolare il suo successo sarà nel taglio delle lamiere.
Inizialmente la tecnologia stenta a prendere piede a causa dell'elevato costo e della difficoltà di utilizzo; essa viene utilizzata solamente per il taglio di pezzi in grandi serie. Il suo sviluppo sarà dovuto, in particolare, alla nascita della tecnologia delle macchine a controllo numerico (CNC) e all'integrazione di questa tecnologia con esse. I vantaggi del taglio al plasma combinati con i macchinari CNC sono notevoli, poiché viene associata all'elevata densità di energia del plasma la precisione della macchina.
Le principali tecnologie per il taglio di lamiere, attualmente, sono:

1. **Taglio ossiacetilenico**

   Il taglio ossiacetilenico sfrutta per il taglio il calore generato dalla combustione di una miscela di ossigeno (comburente) e acetilene (combustibile) che genera una reazione esotermica che avviene a temperature 1600K e 1800K.
   Come è possibile vedere in figura 2.1, il sistema è costituito da due bombole, una

contenente l'ossigeno e l'altra contente acetilene. Prima di essere miscelate nella camera di miscelazione posta all'interno del cannello, esse passano attraverso due riduttori di pressione. Questo è tra i sistemi di taglio presi in considerazione quello più datato e risale all'inizio del 1900; la teoria che sta alla base del suo funzionamento si deve prima a Lavoisier e poi a H. Deville-Sainte-Claire.
Tale tecnologia necessita di materiali contenenti carbonio con grandi spessori compresi tra 10 e 600 mm, poiché essa è particolarmente impattante dal punto di vista termico e spesso comporta deformazioni termiche dopo il taglio.
Inoltre, la qualità del taglio è particolarmente bassa e necessita di lavorazioni successive. Essa, ormai, viene utilizzata quasi esclusivamente per il taglio di grandi spessori.

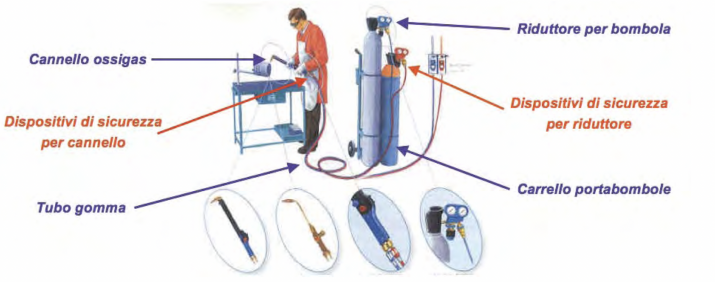


Figure 2.1: Sistema per il taglio ossiacetilenico

2. **Taglio laser**

   É la tecnologia più recente ed è la concorrente principale del taglio al plasma. Essa sfrutta per il taglio l'energia di un fascio di fotoni monocromatici (laser) focalizzato attraverso una lente che minimizza la larghezza del taglio e che massimizza la densità di energia. I sistemi di taglio al laser possono essere suddivisi in base al tipo di sorgente e sono:

   (a) Laser CO_2: Questa è la tecnologia più comune al momento sul mercato. Questo tipo di laser viene ottenuto facendo passare la corrente attraverso una miscela di gas eccitata *DC-excited* oppure utilizzando un sistema a radio frequenze *RF-excited*. Esso è utilizzato per il taglio di materiali in campo industriale come titanio, alluminio, acciai dolci, acciai inox, legno, ecc;

   (b) Laser a fibra: L'utilizzo di questo tipo di tecnologia è in rapido aumento. La differenza sostanziale rispetto alla tecnologia precedente è dovuta al fatto che essa utilizza come "gain medium" un solido e non un gas o liquido. Il laser viene prodotto da un "laser seed" e viene amplificato tramite l'utilizzo della fibra di vetro. É caratterizzato da uno spot molto più piccolo rispetto al CO_2, il che lo rende più adatto nel taglio dei materiali riflettenti. In figura 2.2 è possibile vedere il confronto di funzionamento tra laser CO_2 e il laser fibra.

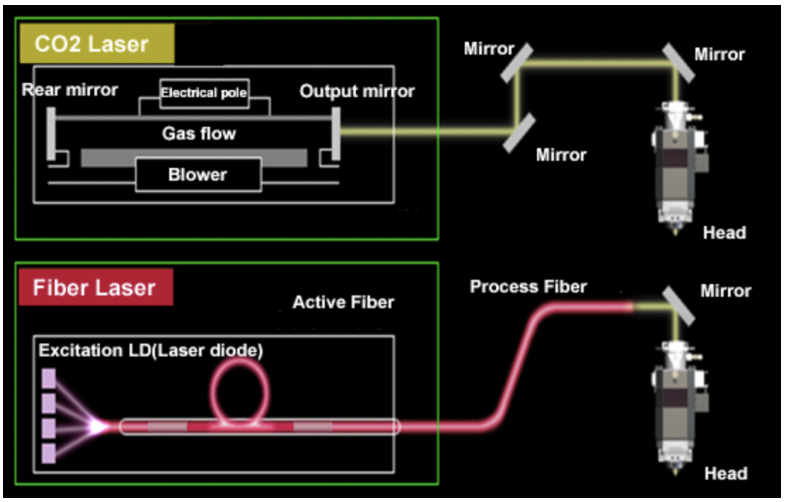


Figure 2.2: Confronto funzionamento tra la tecnologia laser CO_2 e il laser fibra[21]

Durante il taglio, come per quello al plasma, occorre utilizzare un gas che asporti il materiale fuso e in taluni casi crei uno strato di ossido che funga da protezione al bordo di taglio. Si può avere:

- Taglio laser con gas inerte: Nel caso di taglio su materiali particolarmente sensibili all'ossidazione o su cui non si desidera questo fenomeno, si ricorre all'utilizzo di gas inerti per svolgere la funzione di espulsione del materiale fuso durante il taglio; i gas più utilizzati sono azoto, argon ed elio.
- Taglio laser con ossigeno: Nel caso di utilizzo di ossigeno nel taglio si verifica una reazione di ossidazione del materiale, questa reazione è di natura esotermica e, dunque, comporta un aumento locale della temperatura. Questo fenomeno facilita il taglio rendendo possibile un aumento della velocità. Bisogna tener presente che la superficie risultante da questo processo avrà uno strato di ossido superficiale.

Gli spessori lavorabili vanno da 0,8mm a 20mm
Gli svantaggi di questa tecnologia sono il basso rendimento energetico, che la rende una tecnologia particolarmente energivora e dunque molto costosa e il limite di taglio a spessori piccoli rispetto agli altri sistemi di taglio.
I vantaggi, rispetto al taglio al plasma, sono una precisione superiore dovuta all'elevata focalizzazione del fascio e il taglio di qualunque materiale ad eccezione di quelli molto riflettenti.[21]

3. **Taglio al plasma**

Questa tecnologia sfrutta per il taglio un fascio di plasma generato in un gas plasmogeno attraverso una scarica elettrica tra un catodo, situato all'interno della torcia, e un anodo, che può essere o il pezzo da tagliare nel caso di materiale conduttivo (tecnologia ad arco

trasferito) o un anodo realizzato all'interno della torcia stessa (tecnologia ad arco non trasferito). Essa si pone nel taglio degli spessori intermedi da 1 a 50 mm. Per gli spessori intermedi la tecnologia laser avrebbe un rendimento troppo basso per giustificare la lavorazione e il taglio ossiacetilenico produrrebbe deformazioni troppo grandi per poter essere accettate.
Negli ultimi anni lo sviluppo di tale tecnologia l'ha portata ad ottenere ottimi risultati anche su spessori piccoli, e quindi a competere con il sistema laser, con costi nettamente più contenuti.
I vantaggi di tale tecnologia sono il basso costo della lavorazione, l'elevata velocità di taglio e l'ottima qualità del taglio ottenibile. Il principale svantaggio rispetto alla tecnologia laser è quella di poter tagliare solo materiali metallici conduttori. In figura 2.3 è possibile vedere come il taglio al plasma riesca a comprendere circa tutti gli spessori con un ottimo compromesso con la velocità della lavorazione. La zona a bassi spessori è caratterizzata dal confronto tra l'elevata velocità di taglio del laser (su spessori di 1mm circa 1000 cm/min) e quella con il plasma (su 1mm è di circa 700 cm/min). Mentre ad alti spessori il principale concorrente del taglio al plasma è quello ossiacetilenico, che diventa vantaggioso in termini di velocità solo per spessori molto grandi.[25]

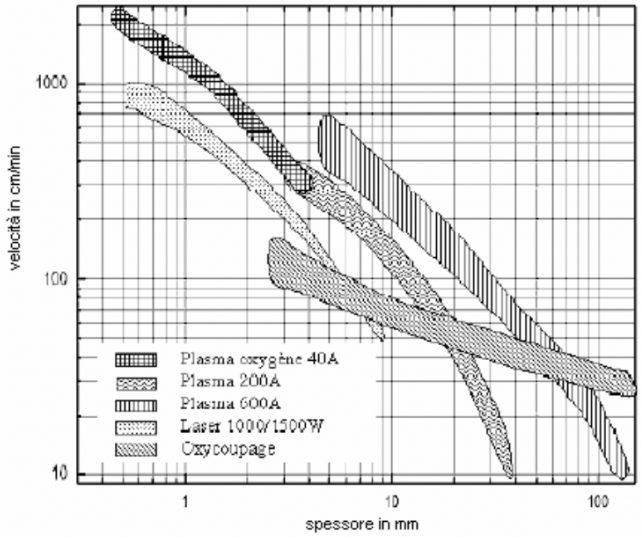


Figure 2.3: Confronto tra le varie tecnologie per il taglio di lamiere

2.1 Descrizione del sistema per il taglio al plasma

Il taglio al plasma sfrutta l'utilizzo di due gas definiti: gas di plasma (plasma gas) e gas di protezione (shield gas). Il primo è utilizzato per creare il flusso di plasma quando attraversato dall'arco elettrico ed è dipendente dal tipo di materiale da tagliare, per esempio viene utilizzato l'ossigeno nel taglio di mild steel, mentre l'azoto per gli acciai inox (il tipo di gas viene modificato per ottenere una superficie di taglio migliore). Il gas di protezione serve a proteggere la torcia dal bagno di metallo fuso che si forma durante il taglio ed è, dunque, necessario per preservare la sua integrità. Anche in questo caso il gas viene modificato in base al tipo di materiale trattato e, sebbene ricopra una minor importanza rispetto al gas di plasma anch'esso interviene sulla finitura superficiale. In generale il sistema di taglio al plasma si compone di:

- Bombola/e di gas di plasma;
- Bombola/e di gas di protezione;
- Riduttori di pressione;
- Generatore di plasma (power supply);
- Gas console;
- Torcia,
- Sistema di raffreddamento a liquido.

Il componente principale è la torcia, poiché essa ha il compito di generare il plasma, creare il flusso di esso tramite un ugello semplicemente convergente, e regolare i flussi e le turbolenze dei gas al fine di stabilizzare la colonna di plasma. Come è possibile vedere in figura 2.4 essa è composta da:

- Tubo dell'acqua di raffreddamento della torcia;
- Elettrodo;
- Anello diffusore;
- Ugello;
- Cappuccio di tenuta dell'ugello;
- Schermo (shield);
- Cappuccio di protezione.

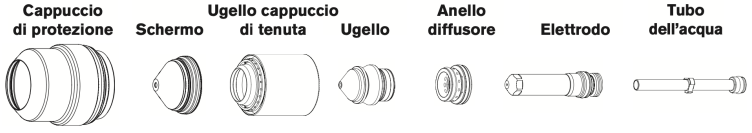


Figure 2.4: Schema componenti interni di una torcia al plasma[18]

I componenti interni alla torcia che meritano un'attenzione particolare sono:

- ***Elettrodo***
  É il catodo del sistema di generazione dell'arco elettrico e quindi riveste il ruolo principale durante il processo.
  A causa dei campi di pressione e temperatura che si generano durante il taglio, esso ha significativi problemi di erosione e deterioramento, i quali rendono la sua vita notevolmente limitata, in particolare in atmosfere ossidanti.
  Solitamente l'elettrodo è composto da una camera atta ad alloggiare il tubo di raffreddamento dell'acqua (come è possibile vedere in figura 2.4), realizzato in un materiale ad alta conducibilità termica, da un inserto emissivo situato sull'estremità superiore e rivolto verso la camera di generazione del plasma. Comunemente i materiali usati per il corpo dell'elettrodo sono rame (Cu), leghe di rame, argento (Ag) e leghe di argento.
  L'inserto utilizzato per torce che operano in ambiente inerte è il tungsteno (W). Purtroppo, nel taglio di acciai dolci fino a 20 mm utilizzando l'ossigeno come gas plasmogeno o in atmosfere ossidanti, esso ha un'erosione critica dovuta alla bassa temperatura di fusione del suo ossido (il punto di fusione del WO_2 è 1500 °C). In tali condizioni vengono quindi utilizzati materiali refrattari i cui ossidi non sono basso fondenti come lo zirconio (Zr), che ha una temperatura di fusione di 1852°C e l'afnio (Hf), che ha una temperatura di fusione di 2222°C (l'ossido di afnio HfO_2 fonde a 2812°C).[25]
  Quando l'afnio viene utilizzato con l'ossigeno come gas di plasma, l'emettitore termoionico è l'ossido di afnio HfO_2. Un aspetto da notare è che HfO_2 si comporta come isolante termico e elettrico a temperatura ambiente mentre nel suo stato fuso diventa un buon conduttore sia termico che elettrico. In figura 2.5 è possibile osservare le principali caratteristiche fisiche dei materiali sopra analizzati.

	Cu	Ag	Hf	Zr
Crystal structure	cfc	cfc	α-hcp (<1760 °C) β-bcc (>1760 °C)	α-hcp (<862 °C) β-bcc (>862 °C)
Melting temperature (°C)	1085	962	2222	1852
Boiling temperature (°C)	2567	2163	3100	4377
Thermal conductivity (W/m K)	398 (at 27°C)	428	22.3 (at 50°C)	21.1
Electrical conductivity (% IACS)	103.06	108.4	-	4.1
Electrical Resistivity (nΩm)	16.7	14.7 (at 0°C)	351	450
CTE (µm/m K)	16.5	19	5.9	5.85
Work function (eV)	4.65 ± 0.05	4.0 ± 0.15	3.9 ± 0.1	4.05 ± 0.1

Figure 2.5: Proprietà fisiche dei materiali costituenti l'elettrodo[34]

- ***Ugello***
  Nel taglio al plasma è richiesta una densità di energia termica trasmessa al pezzo da tagliare dell'ordine di $100-200 kW/cm^2$, e ciò si ottiene tramite un arco estremamente addensato il quale comporta un'alta densità di corrente e di conseguenza elevate temperature, anche per una corrente relativamente bassa.
  Per ottenere una densità di energia maggiore è necessario che il flusso si concentri al centro della colonna di plasma, e questo si ottiene raffreddando la periferia della scarica, creando un rallentamento degli elettroni più esterni e di conseguenza incrementando il flusso centrale, tramite un fenomeno definito "thermal pinch": in questo modo si ottiene un arco più concentrato, più uniforme e più stabile, incrementando la capacità di taglio del sistema. Per far sì che ciò avvenga è, dunque, necessario che l'ugello sia raffreddato tramite un sistema di raffreddamento ad acqua.
  Perché ciò avvenga è quindi necessario che l'ugello sia un ottimo conduttore sia termico che elettrico, e dunque solitamente esso è fatto di rame (Cu).

- ***Anello diffusore***
  Esso è il componente che regola il flusso di "swirl" intorno all'elettrodo, in modo da centrare il flusso di plasma e restringere la colonna. Lo "swirl" è un particolare tipo di turbolenza generato da un *condotto orientato* o *elicoidale*, il quale imprime un movimento rotatorio organizzato su un piano circonferenziale. Il condotto dell'anello imprime una velocità non uniforme sulla circonferenza, facendo sì che il flusso si orienti verso le pareti, le quali genereranno a loro volta un moto tangenziale di swirl comportando una concentrazione e la stabilizzazione dell'arco.

Essi sono generalmente costruiti in ceramica o più raramente in plastica.

- ***Schermo***

  La funzione dello schermo (o *shield*) è quella di proteggere l'ugello dal materiale fuso che zampilla durante la fase di sfondamento e la fase di taglio. Essendo di solito elettricamente isolato, esso riduce la probabilità di formazione del fenomeno del doppio arco. Durante il funzionamento il gas di protezione viene fatto passare tra l'ugello e lo schermo sia per raffreddare i componenti sia per proteggere ulteriormente la torcia dal metallo fuso, sia, infine, per amplificare la costrizione dell'arco. Esso può generalmente essere costruito in ceramica, rame o plastica.

I componenti sopra elencati sono definiti consumabili, poiché essi con il passare dei tagli e in particolare degli inneschi tendono a subire un fenomeno di usura più o meno accentuato e devono essere sostituiti.
Solitamente si effettua la sostituzione contemporaneamente di: elettrodo, ugello e shield; questo perché l'usura del primo componente (l'elettrodo) solitamente causa a cascata il degrado degli altri, i quali compromettono la stabilità del flusso nel caso dell'ugello, la protezione della torcia e la stabilizzazione finale del flusso per lo schermo.
L'anello diffusore, invece, viene sostituito più raramente, poiché esso non lavora in condizioni particolarmente difficili e solitamente viene sostituito quando avviene l'otturazione totale o parziale dei condotti orientati.

2.2 Analisi del taglio al plasma

La procedura di taglio inizia con la generazione di un arco elettrico di bassa intensità, definito arco pilota, tra elettrodo (catodo) e ugello (anodo); tale arco scorre all'interno della torcia fino a collegarsi con il pezzo da tagliare, il quale sarà il reale anodo durante il taglio, come è possibile vedere in figura 2.5. Nel momento in cui l'arco pilota identifica il pezzo come catodo inizia la fase di innesco e tramite una rampa si genera l'arco elettrico, definito arco trasferito, che determinerà la creazione del plasma attraversando il gas plasmogeno. Genericamente in questa fase il pezzo da tagliare si trova a circa 5-15mm dall'ugello. Nella fase di innesco vengono utilizzati gas e pressioni differenti rispetto a quelli della fase di taglio, e lo switch da una configurazione all'altra avviene tramite la gas console.

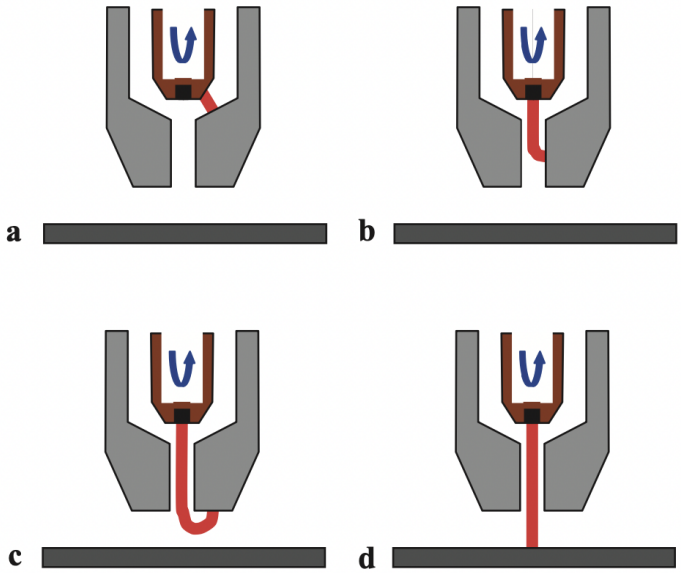


Figure 2.6: Fasi di accensione dell'arco elettrico:(a) innesco dell' arco pilota (b) Scorrimento arco pilota nella torcia (c) Identificazione del pezzo (d) Spegnimento arco pilota, innesco dell'arco trasferito[25]

Dopo l'innesco dell'arco inizia la fase di taglio, ed essa può iniziare dal bordo della lamiera o in mezzo a quest'ultima. La prima soluzione viene utilizzata nel caso di spessori elevati, poiché nella fase di innesco se lo spessore è troppo elevato prima di sfondare la lastra il bagno di materiale fuso, malgrado il gas di protezione, entrerebbe in contatto con la torcia rovinandola. Nel caso in cui non sia possibile partire da bordo lamiera si opta per la seconda soluzione, ma con un invito fatto tramite una testa foratrice, in modo da ovviare al problema sopracitato. La

seconda soluzione viene utilizzata nel caso di piccoli spessori, dove nella fase di innesco lo sfondamento della lamiera avviene quasi istantaneamente senza che la torcia entri in contatto con il bagno fuso. Durante la fase di taglio la difesa della torcia e dei suoi componenti dal metallo fuso è affidata al gas di protezione. Per un taglio ottimale e costante è necessario che durante esso le pressioni dei gas e la distanza tra torcia e lamiera si mantengano costanti. Per il controllo della distanza torcia-lamiera i nuovi macchinari possiedono il sistema THC (Torch Height Control) tramite il quale la distanza viene monitorata per mezzo della variazione di tensione tra anodo e catodo; nel caso in cui la lamiera non fosse perfettamente piana, la torcia, risentendo della variazione di tensione dovuta all'aumento o alla diminuzione della distanza torcia-lamiera e, dunque, per cercare di mantenerla costante, dovrà alzarsi/abbassarsi. Per quanto riguarda la pressione di taglio il macchinario è dotato di una "gas console" che opera mantenendo costante la pressione di tutti i gas necessari per il taglio.[25]

2.2.1 Bilancio energetico

Il bilancio dell'energia dell'arco, nel caso di assenza di reazioni chimiche tra metallo e flusso di plasma, è particolarmente semplice, poiché esso è semplicemente dato dal prodotto tra corrente e tensione.
In presenza di reazioni chimiche, come nel taglio dell'acciaio in presenza di ossigeno o di aria, sarà necessario aggiungere alla potenza elettrica la potenza termica generata dalla reazione.
Nell'analisi energetica del processo è particolarmente importante analizzare la componente di energia che interviene nel taglio.
Da numerosi studi condotti sull'argomento[1] risulta che circa il 70% dell'energia elettrica è convertita in entalpia del flusso di plasma, mentre la parte restante è dissipata all'interno della torcia sotto forma di calore. La potenza utilizzabile nel taglio è circa la metà rispetto all'entalpia della colonna di plasma, poiché solo la metà di essa entra in contatto con la superficie, per cui solo il 35% della potenza elettrica viene utilizzata per il taglio. A questa quota è necessario aggiungere la componente di calore dovuta alle reazioni chimiche, in particolare nel caso dell'ossigeno, si stima che il 45% del flusso di ossigeno intervenga nella reazione 2Fe+O_2=2FeO. La potenza che si ottiene è il 25% della potenza elettrica totale ed è quasi uguale alla potenza necessaria per la fusione del pezzo da tagliare. Inoltre, risulta che un ulteriore 25% della potenza elettrica è dispersa nell'ugello e tra la torcia e il pezzo: si indica come $Q_{lost-up}$. Sottratte tutte queste perdite interne alla torcia e tra la torcia e il pezzo è possibile ottenere la potenza del flusso di plasma, che negli studi precedentemente enunciati viene definito Q_{ker}. A questo termine occorre sommare la componente dovuta al

[1] Gli studi sono stati condotti da Nemchinsky (1997), Ramakrishnan (2000), Freton (2002), Teulet (2006) e Kavka (2014)

fenomeno di ossidazione, Q_{oxy}, ottenendo dunque $Q_{ker} + Q_{oxy}$ che rappresenta la potenza totale disponibile del flusso di plasma Q_{cut}.
Parte di questa potenza viene spesa per fondere il materiale Q_{melt} e un'ulteriore parte viene dissipata dalla conduzione termica della piastra Q_{hcl}. Esiste un'ultima dispersione che si genera quando il flusso di plasma attraversa completamente la piastra ed entra in contatto con l'atmosfera circostante, è definita $Q_{lost-down}$.[25] È possibile vedere la schematizzazione del fenomeno in figura 2.7 e riassumere il bilancio nel modo seguente:

$$\begin{cases} Q_{tot} - Q_{lost-up} = Q_{kerf} \\ Q_{cut} - Q_{oxy} = Q_{cut} \\ Q_{cut} - Q_{hcl} - Q_{melt} = Q_{lost-down} \end{cases} \tag{2.1}$$

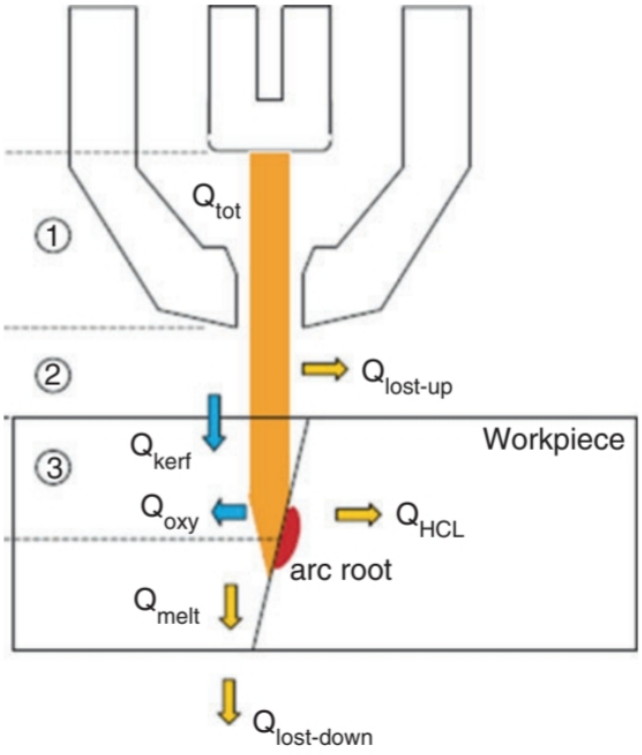


Figure 2.7: Schema bilancio energetico durante il processo di taglio (Teulet 2006)[25]

Dagli studi condotti da Teulet (2006) è risultato che le potenze disperse all'esterno della torcia hanno una stretta dipendenza con la variazione della velocità come è possibile vedere in figura 2.8. L'esperimento è stato condotto mantenendo costanti corrente (60A) e tensione (140V) e

facendo variare la velocità di taglio, misurando le dispersioni tramite opportune termocoppie. È possibile notare come al variare della velocità non ci siano variazioni dei termini Q_{tot}, Q_{oxy}, Q_{cut}, il che lascia intendere che tali termini e la dispersione tra torcia e lastra $Q_{lost-up}$ non siano dipendenti da tale parametro. Al contrario all'aumentare della velocità la potenza dispersa dovuta alla conduzione della piastra Q_{hcl} subisce un notevole incremento insieme a quella per la fusione del materiale Q_{melt} mostrando, invece, una diminuzione del termine $Q_{lost-down}$. Questi dati mostrano come all'aumentare della velocità si migliora notevolmente la trasmissione di calore alla piastra riducendo il termine disperso oltre la piastra. Si potrebbe, dunque, pensare che il fatto di aumentare la velocità di taglio sia un fattore positivo in assoluto, ma un'attenta analisi mostra che non è così, poiché è vero che esso comporta una maggiore trasmissione di potenza al pezzo da tagliare, riducendo le perdite esterne, ma l'importanza del termine $Q_{lost-down}$ risiede nell'essere un parametro indicante la qualità di sfondamento della piastra da parte del flusso di plasma, quindi un valore troppo basso o nullo (situazione che corrisponderebbe al massimo dei valori di conduzione Q_{hcl} e di fusione Q_{melt}) di esso starebbe a significare una scarsa o nulla (caso $Q_{lost-down}$=0) penetrazione del fascio all'interno del materiale, comportando un taglio insufficiente o nullo.[25]

Cutting speed v_t (cm min − 1)	Q_{tot} (W)	Q_{oxy} (W)	Q_{cut} (W)	Q_{HCL} (W)	Q_{melt}	$Q_{lost-down}$ (W)
50	8400	1900	8200	1600	1800	4800
70	8400	1900	8200	2100	2450	3650
100	8400	1900	8200	2800	3400	2000
130	8400	1900	8200	3400	4100	700

Figure 2.8: Dipendenza delle potenze di taglio in funzione della velocità di taglio (Teulet 2006)[25]

Ulteriori studi condotti da Kavka (2014) mostrano la dipendenza delle potenze in funzione del flusso di gas mantenendo costanti corrente e tensione.
Osservando i dati riportati in figura 2.9 è possibile notare come l'aumento della portata in massa di gas plasmogeno comporti un aumento della potenza totale generata P_{tot}, e, contro intuitivamente, una diminuzione percentuale della potenza termica ceduta oltre la lastra $Q_{lost-down}$ e di quella che interviene nel taglio Q_{cut}; mentre la potenza ceduta per conduzione Q_{hcl}rimane, sempre percentualmente, pressocché inalterata. Dall'analisi dei valori riportati appare evidente che l'aumento della portata comporta un incremento del termine di dissipazione tra l'ugello e la lastra, che precedentemente abbiamo indicato con il termine $Q_{lost-up}$[25]

Flow rate	P_{tot}	Q_{lost_down}		Q_{HCL}		Q_{cut}	
g/min	kW	kW	%	kW	%	kW	%
9	8.4	3.621	43.10714	3.02	36	1.337345	22
11	8.88	3.566	40.15766	3.20	36	1.202437	19
15	9	3.302	36.688889	3.24	36	1.105357	17

Figure 2.9: Variazione delle potenze che intervengono nel taglio in funzione del flusso di gas. Kavka (2014)[25]

Grazie al lavoro di Martin (2013) (vedi figura 2.10) è stato possibile validare i valori della potenza di ossidazione utilizzati da Teulet (figura 2.8). L'esperimento è stato condotto effettuando il taglio in acqua utilizzando un calorimetro per calcolare la variazione del rapporto tra la potenza dovuta alla reazione chimica e quella totale, esprimendo la relazione in funzione alla velocità di taglio.
È possibile vedere in figura 2.10 che non esiste relazione tra la velocità di taglio e il rapporto Q_{cut}/Q_{tot}, come ipotizzato da Teulet, e tale rapporto vale circa $Q_{cut}/Q_{tot} = 0,23\%$[25]

Flow rate	P_{tot}	Q_{lost_down}		Q_{HCL}		Q_{cut}	
g/min	kW	kW	%	kW	%	kW	%
9	8.4	3.621	43.10714	3.02	36	1.337345	22
11	8.88	3.566	40.15766	3.20	36	1.202437	19
15	9	3.302	36.688889	3.24	36	1.105357	17

Figure 2.10: Valori del rapporto potenza chimica e totale in funzione della velocità di taglio. (Martin 2013)[25]

2.2.2 Descrizione del funzionamento del catodo

Il catodo è l'elemento principale all'interno della torcia e il suo ruolo è fondamentale per il taglio al plasma, poiché esso ha il ruolo di assicurare una corrente continua per la generazione del plasma.
Gli elettroni necessari a creare l'arco sono costretti a superare una barriera di potenziale per poter lasciare il metallo. La natura di questo fenomeno è prettamente legata alla meccanica quantistica. In figura 2.11 è possibile osservare il diagramma di energia degli elettroni nella situazione:

a. Assenza di campo elettrico esterno;

b. Campo elettrico esterno moderato;

c. Campo elettrico esterno forte.

Nel secondo caso, il campo elettrico riduce la barriera di potenziale in modo che il lavoro necessario ad estrarre l'elettrone sia minore rispetto al primo caso, quello in assenza di campi. La diminuzione del lavoro necessario è chiamata *correzione di Schottky*, calcolata come: $\Delta\phi = \sqrt{e^3 E}$;
dove e indica la carica dell'elettrone, E il valore del campo elettrico esterno e ϕ è definita *funzione di lavoro*.
Nei primi due casi (a) e (b) l'emissione di elettroni avviene in forma termoionica, ovvero essi lasciano il metallo solo se possiedono un'energia sufficientemente alta per oltrepassare la barriera.
Quando il campo esterno è molto intenso, è come se la barriera cominciasse ad assottigliarsi e gli elettroni potessero sfruttare questo tunnel per lasciare il metallo, anche se la loro energia non sarebbe sufficiente per oltrepassare la barriera di potenziale. Questo fenomeno prende il nome di "emissione di campo".
[26] Il catodo per taglio al plasma funziona tramite processo termoionico con un moderato campo esterno applicato.

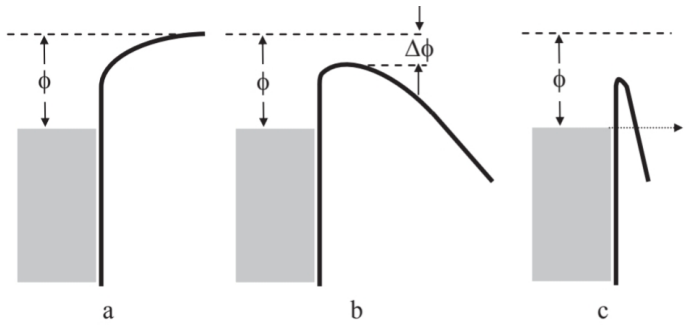


Figure 2.11: Diagramma dell'energia di un elettrone in condioni di campo elettrico esterno debole (a), moderato (b), forte (c)[25]

Gli elettroni emessi sono accelerati dalla caduta di potenziale del catodo e ionizzano gli atomi neutri. Gli ioni, a loro volta, sono accelerati dalla caduta di tensione del catodo e viaggiano attraverso di esso. Nel momento in cui essi raggiungono l'estremità, urtano contro la superficie del catodo convertendo in calore la loro energia cinetica e potenziale.
La superficie emittente del catodo deve avere una temperatura molto elevata per poter emettere elettroni, per questo è necessario che il flusso di calore del catodo sia concentrato in un'area molto ristretta. Nei sistemi per il taglio al plasma con centinaia di Ampère di corrente la superficie è quasi di 1mm.

Per la descrizione matematica del comportamento del catodo si ricorre al cosiddetto *principio minimo*. In esso la temperatura, la densità di corrente e la variazione di tensione sono

disaccoppiati; inoltre, si assume che durante lo spot del catodo il calore si distribuisca uniformemente in modo circolare attorno al raggio.[26] Per descrivere la densità di corrente si ricorre all'espressione elaborata da Richardson:

$$J_e = AT^2 \exp\left(\frac{e\phi}{k_B T}\right)$$

dove:

- A è la costante di Richardson (A=120 $Acm^{-2}K^{-2}$);
- ϕ è la funzione di lavoro (corretta tramite l'espressione di Schottky);
- T è la temperatura assoluta della superficie del catodo;
- k_B è la costante di Boltzmann.

L'espressione del bilancio di energia è data da:

$$J_e V_c = J_i E_{ion} + \beta \frac{k_b}{e} T_p (J_e + J_i)$$

dove:

- V_c è la caduta di tensione al catodo;
- J_i è la densità di corrente degli ioni sulla superficie del catodo;
- E_{ion} è il potenziale di ionizzazione del gas plasmogeno;
- T_p è la temperatura del plasma;
- β è un coefficiente dipendente dal meccanismo di diffusione degli elettroni (esso vale 3.2 per la diffusione coulombiana).

È possibile osservare una schematizzazione del bilancio di energia in figura 2.12.

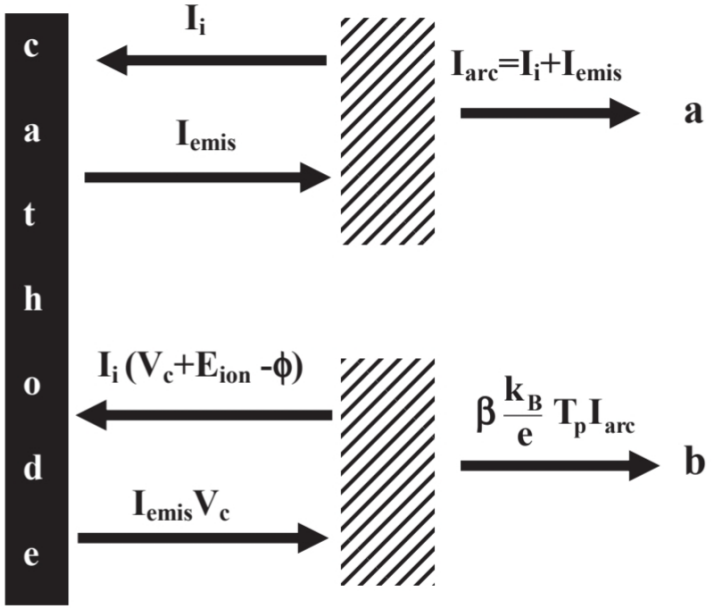


Figure 2.12: Schematizzazione del bilancio di energia del catodo[25]

Il termine J_i può essere espresso come:

$$J_i = \frac{e}{4} n(T_p) \sqrt{\frac{8 k_B T_p}{\pi M}}$$

dove:

- $n(T_p)$ è la densità di particelle cariche (secondo l'equazione di Saha);
- M è la massa degli ioni.

La densità del flusso di calore sulla superficie del catodo è:

$$q = J(V_c - \phi) + \beta \frac{k_B}{e} T_p J$$

Per ottenere la temperatura generata dalla corrente è necessario risolvere l'equazione di trasmissione del calore sopra con le opportune condizioni al contorno tra catodo e plasma.

2.2.3 Erosione del catodo

Il problema principale nel processo di taglio al plasma è l'usura dei consumabili, e in particolare l'erosione del catodo, poiché il suo degrado comporta un netto peggioramento della qualità del taglio, un'usura accelerata degli altri consumabili e ne deriva che la loro sostituzione diventa un problema di natura anche economica. Il processo termoionico comporta un'erosione del catodo. Come visto in precedenza è possibile utilizzare due tipi di catodi a seconda del tipo di taglio da effettuare: per i tagli in atmosfera inerte si utilizza come materiale il tungsteno, mentre per tagli in atmosfera ossidante si utilizza l'afnio o lo zirconio.
Il degrado degli elettrodi in tungsteno è relativamente ridotto, tranne in condizioni particolari di alte correnti o ridotto raffreddamento, ma purtroppo il suo utilizzo è limitato, poiché in atmosfera ossidante la formazione di ossido di tungsteno WO_2, essendo molto volatile, causa un'erosione estremamente drastica.
In caso di taglio con ossigeno o aria si deve dunque ricorrere all'afnio o lo zirconio, e anche se l'erosione dell'afnio è inferiore a quella del tungsteno in tale situazione, ma rimane pur sempre più critica rispetto a quest'ultimo in condizioni di gas inerte.
Il degrado aumenta all'aumentare della corrente e anche all'aumentare della pressione, e ciò comporta un limite nella tecnologia.
L'elettrodo di afnio rimane nel suo stato puro solo nella fase iniziale del taglio, prima del primo innesco, mentre per il resto del taglio (per la durata dell'elettrodo) la funzione di emissione sarà svolta dal suo ossido. Il diossido di afnio HfO_2 ha una bassa pressione di vapore e una bassa funzione di lavoro, e allo stesso tempo l'ossido a temperatura ambiente ha caratteristiche di isolante sia termico che elettrico (esso ha una scarsa conducibilità elettrica e termica).[26]

Analizzando più nello specifico è possibile distinguere i seguenti tipi di modalità di erosione:

1. **Erosione a corrente costante**

   Questo particolare tipo di erosione è quello che si verifica durante il taglio continuativo, ovvero tra un innesco e l'altro, quando l'elettrodo lavora in condizioni di corrente costante.
   Per comodità per analizzare il livello di erosione e decadimento dell'elettrodo si utilizza come parametro la profondità del cratere che si forma all'interno di esso, poiché esso è sicuramente un parametro di semplice misurazione, e permette anche di interpretare condizioni di funzionamento errati in funzione dello scostamento dal centro elettrodo.
   In figura 2.13 è possibile osservare come l'erosione del catodo sia caratterizzato da tre zone principali. La prima parte (A) è il rapido decadimento dovuto alla fase iniziale di utilizzo in cui il decadimento è molto marcato (fase del primo innesco). La seconda fase è descrive l'erosione che caratterizza la maggior parte della vita dell'elettrodo; in essa è possibile osservare un drastico cambiamento del comportamento del fenomeno poiché

esso dopo una fase iniziale di rapido decadimento tende a stabilizzarsi e l'erosione diventa più controllata fino alla fase finale (C). Quest'ultima è caratterizzata da un crollo delle prestazioni e un aumento quasi esponenziale del decadimento; essa è la fase di rottura dell'elettrodo.
L'erosione a corrente costante è dipendente dai seguenti fattori: corrente d'arco, pressioni dei gas, turbolenze dovute al flusso di gas in prossimità dell'elettrodo.
La pressione dei gas influisce poiché il suo aumento causa a sua volta l'aumento della densità di corrente, il che significa una maggior emissione da parte del catodo e quindi un aumento della temperatura di esso, che è la causa principale dell'erosione.
In figura 2.14 è possibile osservare l'andamento della profondità del cratere in funzione della variazione di pressione e come essa aumenti all'aumentare di quest'ultima.
L'aumento della corrente agisce in maniera analoga a sopra, comportando un innalzamento locale della temperatura. L'ultimo fenomeno analizzato è il contributo dello swirl[2] all'erosione.
Tale parametro, oltre a causare un aumento della profondità del cratere, causa anche uno scostamento del cratere stesso a seconda dell'entità dello swirl (la distanza è determinata dalla componente di velocità tangenziale del gas): si introduce, infatti, il parametro di swirl definito come rapporto della distanza dal raggio interno dello swirl ring. In figura 2.15 è possibile osservare il diagramma di erosione in funzione del parametro di swirl.[26]

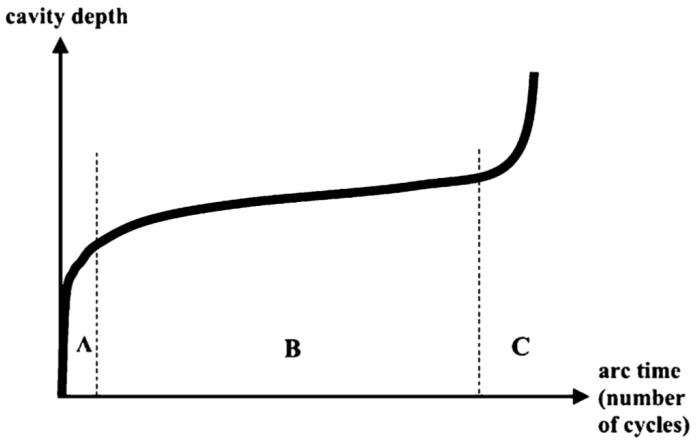


Figure 2.13: Diagramma della profondità di erosione del catodo in funzione del tempo [25]

[2] Come visto in precedenza, con esso ci si riferisce al movimento rotatorio organizzato del flusso di gas su di un piano circonferenziale, derivato dalla componente tangenziale della velocità che entra nella camera. Esso è creato dall'anello diffusore o "swirl-ring".

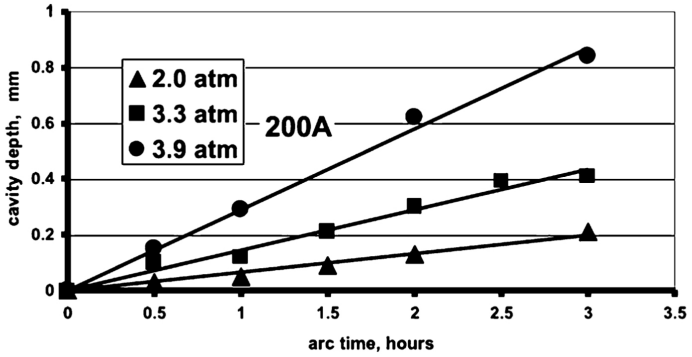


Figure 2.14: Diagramma della variazione della profondità del cratere in funzione della pressione nel tempo (Nemchinsky 2003)[25]

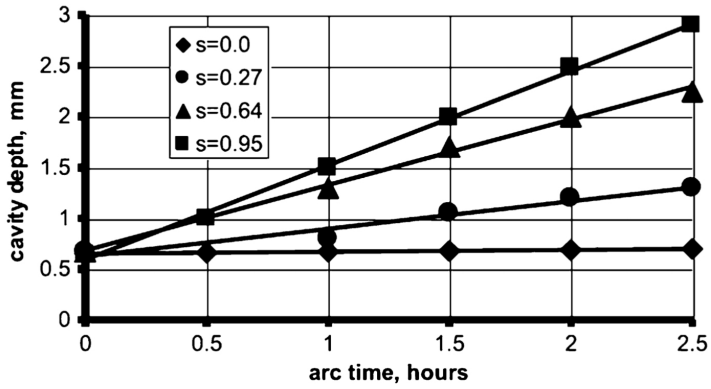


Figure 2.15: Diagramma di erosione in funzione del parametro di swirl (Nemchinsky 2014)[25]

Questo particolare tipo di erosione si crede sia dovuto all'evaporazione e dunque è possibile modellizzare il fenomeno conoscendo la temperatura del catodo e calcolando il flusso di densità di evaporazione degli atomi, come:

$$\Gamma_0 = \sqrt{\frac{M}{2\pi k_B T}} p(T)$$

Bisogna tener conto di un fenomeno di ricombinazione delle particelle evaporate che essendo ancora in prossimità del catodo si ricongiungono con esso; si introduce l'"escape factor" ν, ottenendo il flusso:

$$\Gamma = \Gamma_0 \nu$$

In figura 2.16 è possibile osservare il diverso comportamento delle linee di flusso al variare del parametro di swirl. Nel caso senza swirl, le linee di flusso creano un vortice di

plasma che si chiude verso il catodo, per trovare una condizione di stabilità di velocità solo 5-8mm oltre l'elettrodo.
Nel caso di presenza di swirl le linee di flusso non creano vorticosità sulla superficie dell'elettrodo, ma ne seguono la superficie.
Questa differenza tra i due comportamenti causa uno scostamento del cratere di erosione rispetto al centro dell'elettrodo.[26]

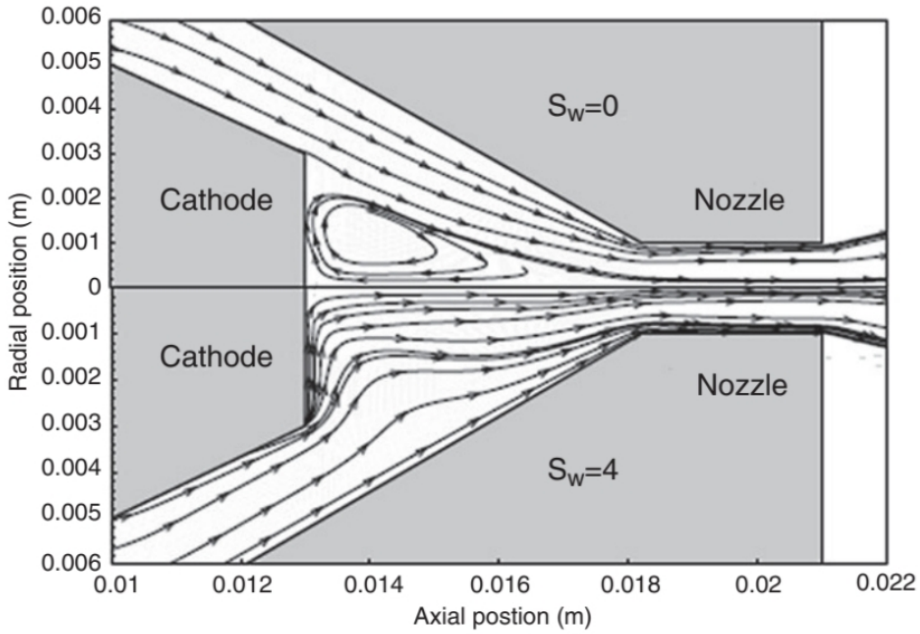


Figure 2.16: Linee di flusso del gas per S=0 e S=4 (Zhou 2009)[25]

2. **Erosione ciclica**

La fase di taglio continuativa, quella che genererebbe un'erosione a corrente costante, avviene solo per brevi lassi di tempo fino a qualche minuto. Il taglio, infatti, si compone di fasi che si ripetono in maniera ciclica e sono: fase di accensione dell'arco, fase di taglio, fase di spegnimento dell'arco.
La criticità maggiore a livello di degrado dell'elettrodo è data dalla prima e dall'ultima fase, ovvero quelle di accensione e spegnimento dell'arco; questo tipo di erosione prende il nome di *erosione ciclica*.
Ogni volta che viene generato l'arco elettrico il catodo perde massa, fenomeno definito *start erosion*; essa è particolarmente violenta nella prima accensione in assoluto, la "first start erosion", quando a partecipare alla reazione è l'Hf puro e non il suo ossido, l'HfO_2.
Secondo studi effettuati da Peters, la prima erosione avviene sotto forma di emissione di piccole gocce di materiale, dopo l'innesco dell'arco. Dopo circa 100ms avvengono anche la seconda e la terza emissione, che possono essere ridotte agendo sulla rampa

della corrente e aumentando il flusso di gas.
Questo fenomeno si verifica anche nella fase di spegnimento dell'arco. Ulteriori studi condotti hanno validato quelli Peters e hanno osservato come la superficie del catodo dopo la fase di spegnimento possieda una struttura ondulata e la presenza di cricche e porosità sotto lo strato di ossido (HfO_2). In figura 2.17 è possibile osservare l'andamento della profondità del cratere in funzione del tempo di interruzione dell'arco. I risultati sono che un basso tempo ciclo causa un'erosione molto più rapida, con un decadimento dell'elettrodo più drastico, mentre incrementando i tempi di spegnimento la curva tende ad avere un andamento meno pronunciato con una durata notevolmente superiore.[26]

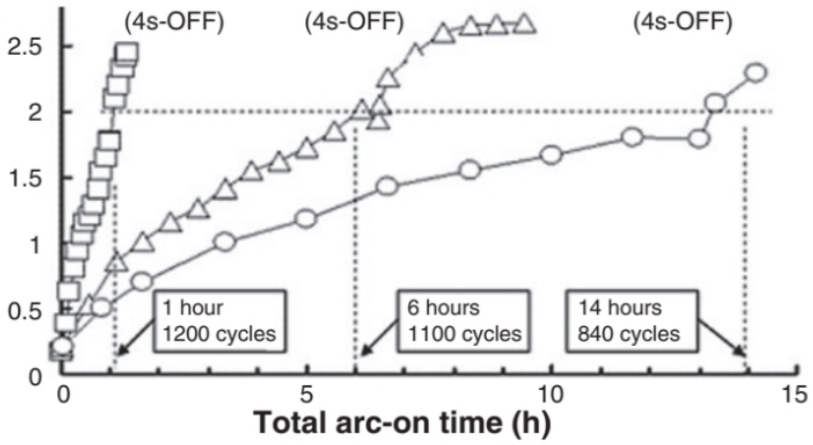


Figure 2.17: Variazione della profondità del cratere in funzione del tempo ciclo, per 3s(quadrati), 20s (triangoli), 60s (cerchi). (Yamaguchi 2010)[25]

3. **Erosione alla prima accensione**

   Come visto in precedenza, la prima accensione dell'arco è particolarmente impattante dal punto di vista dell'erosione dell'elettrodo.
   Le cause possono essere una di natura chimica e l'altra geometrica.
   La prima è dovuta al fatto che il primo cratere crea lo strato di ossido di afnio, che era assente in precedenza, strato di notevole importanza nel processo di taglio. La seconda è legata alla geometria della superficie, che inizialmente ha una forma perfettamente piana, mentre nelle successive accensioni sarà caratterizzata dal cratere centrale, e questo modifica completamente il flusso di gas su di essa.
   È possibile osservare in figura 2.18 come il comportamento del cratere in pochi cicli sia dipendente solo dal primo innesco, che comporta il degrado maggiore, per poi stabilizzarsi attorno a quel valore. Nel grafico 2.19, invece, è possibile osservare, come sopra, l'andamento del cratere di due elettrodi, di cui uno con superficie intatta prima del primo innesco e l'altro con un'incisione sulla superficie (in questo caso il numero di

inneschi aumenta notevolmente).[25]

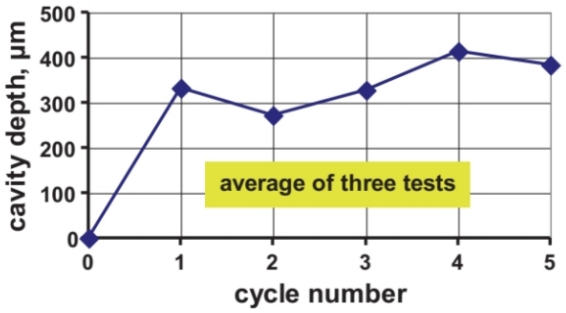


Figure 2.18: Profondità del cratere dopo pochi inneschi (Colombo 2010)[25]

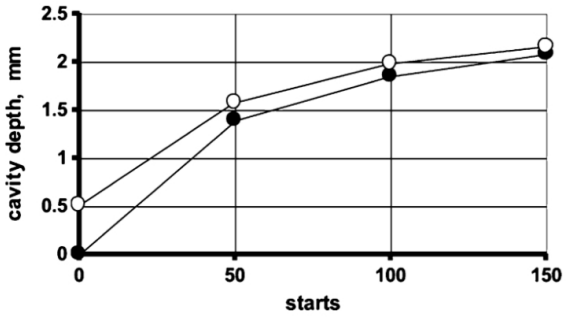


Figure 2.19: Profondità del cratere di due elettrodi sottoposti a numerosi inneschi. Elettrodo intatto (cerchio pieno), elettrodo con intaglio (cerchio vuoto).[25]

2.2.4 Fenomeno del doppio arco

Un altro fenomeno che limita la tecnologia del taglio al plasma è quello del cosiddetto *doppio arco*. Esso pone limiti notevoli nella variazione e ottimizzazione dei parametri di taglio, nonché limiti a livello costruttivo.
Per raggiungere un'elevata densità di energia il fascio di plasma è costretto a fluire attraverso un ugello semplicemente convergente. Il diametro di quest'ultimo è particolarmente stretto e ciò comporta un aumento notevole della densità di corrente al suo interno e con esso avviene una brusca caduta di tensione.
Come è possibile osservare in figura 2.20 in caso di normale funzionamento (a) l'ugello ha come funzione solamente quella di aumentare la velocità del flusso e la densità di energia, senza partecipare dal punto di vista elettrico all'arco. Riducendo ulteriormente il diametro del

foro, o aumentando la lunghezza dell'ugello si incorre nel fenomeno del doppio arco, ovvero si creano due archi di plasma separati, uno dall'elettrodo all'ugello e un altro dall'ugello al pezzo, mentre in condizioni di normale funzionamento l'ugello non partecipa elettricamente ed è quindi da questo punto di vista isolato rispetto al sistema.
Esiste un effetto benefico del fenomeno, cioè quello di diminuire la tensione totale, visto che generando un arco interno elimina la tensione all'interno dell'ugello; ma essa ha come aspetto negativo quello di distruggere l'ugello, e dunque la sua formazione è un problema per l'integrità del sistema.[25]

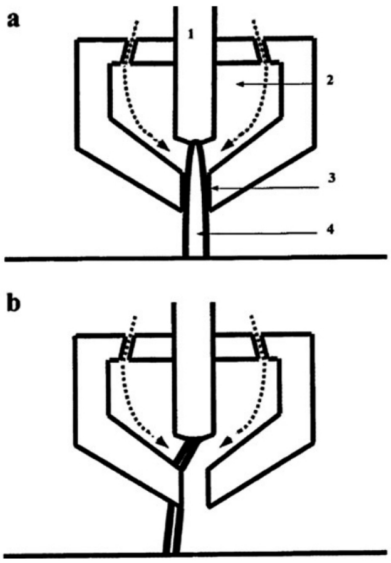


Figure 2.20: Caso di funzionamento corretto del sistema elettrodo-ugello (a), Fenomeno del doppio arco (b)[25]

In conclusione, è possibile ritrovare le cause del fenomeno del doppio arco in una o più delle seguenti condizioni:

- corrente troppo elevata;
- foro di uscita dell'ugello troppo stretto;
- canale dell'ugello troppo lungo;
- flusso di gas troppo scarso;
- swirl insufficiente.

Solitamente, a meno di difetti di fabbricazione, il fenomeno del doppio arco è difficile si manifesti a causa della geometria dell'ugello; quindi, le cause vanno ricercate nelle altre condizioni. Nel caso in cui si manifesti a pressioni di lavoro di progetto è necessario variare

la corrente riducendola, mentre se è quest'ultima ad essere quella di progetto è necessario operare sulla pressione del gas o sostituire l'anello diffusore (swirl ring).[25]

2.3 Qualità del taglio

La normativa di riferimento nel caso di analisi e misurazione della qualità del taglio (plasma, laser e ossiacetilenico) è la ISO 9013. Tale norma definisce sia le grandezze da misurare sia il sistema di misurazione di esse per poter descrivere la qualità del taglio. Essa è applicabile al taglio ossiacetilenico da 3mm a 300mm, al taglio al plasma da 1mm a 150mm e al taglio al laser da 0,5mm a 40mm.[19]

2.3.1 Normativa ISO 9013 - Nomenclatura

Nomenclatura nel caso di pezzo in lavorazione

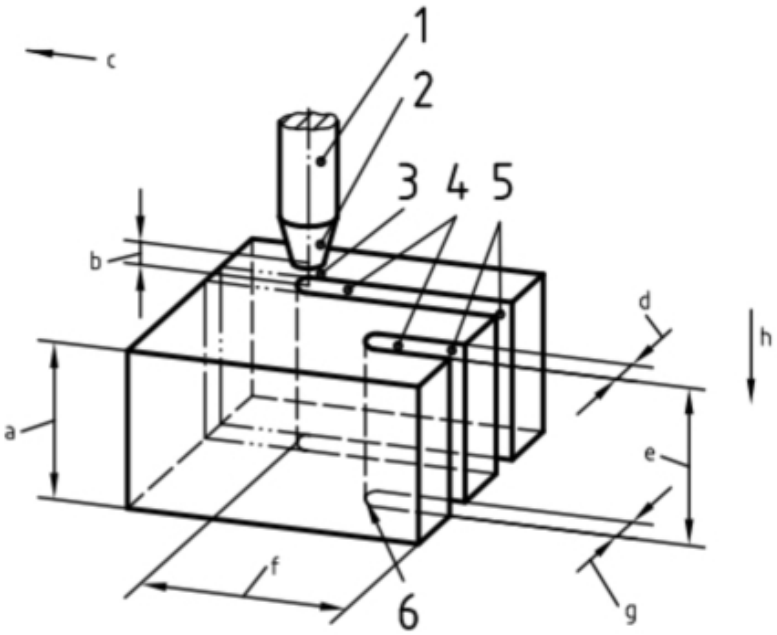


Figure 2.21: Nomenclatura del processo di taglio sul pezzo in lavorazione[19]

Terminologia:

1. Torcia
2. Ugello
3. Arco elettrico (fascio di plasma)
4. Kerf
5. Inizio taglio
6. Fine taglio

a Spessore del pezzo

b Distanza ugello-pezzo

c Direzione di taglio

d Larghezza del taglio superiore

e Profondità di taglio

f Lunghezza del taglio

g Larghezza del taglio inferiore

Nomenclatura nel caso di pezzo finale

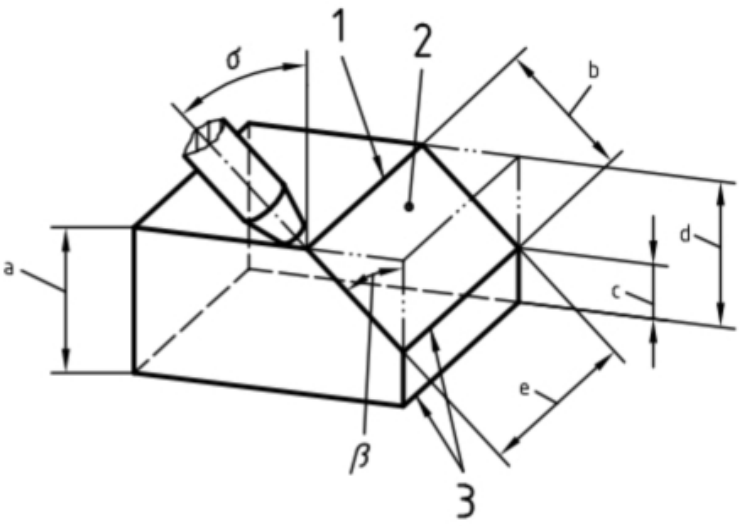


Figure 2.22: Nomenclatura relativa al pezzo finito[19]

Terminologia:

1. Bordo di taglio superiore
2. Superficie di taglio
3. Bordo di taglio inferiore

a Spessore del pezzo

b Profondità di taglio (prima possibilità)

c Distanza del taglio dalla base del pezzo

d Profondità di taglio (seconda possibilità)

e Lunghezza di taglio

Tipi di taglio

- **Caso taglio rettilineo**

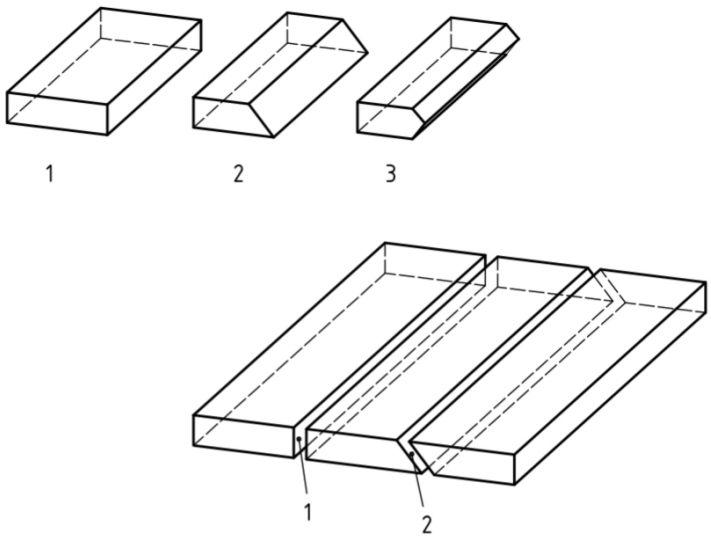


Figure 2.23: Tipi di taglio rettilineo[19]

Terminologia taglio dritto:

1. Taglio verticale (o taglio dritto)

2. Taglio inclinato
3. Doppio taglio inclinato

- **Caso taglio vario**

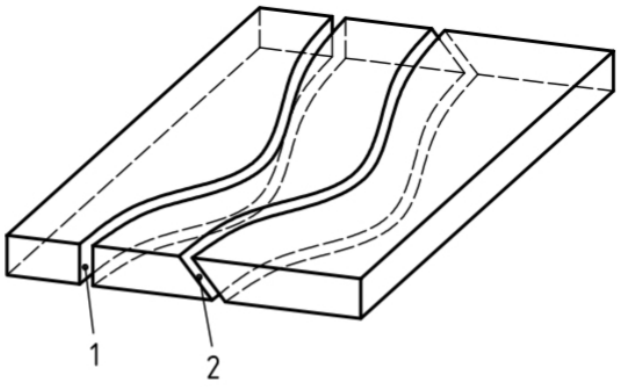


Figure 2.24: Tipi di taglio vario[19]

Terminologia taglio dritto:

1. Taglio verticale (o taglio dritto)
2. Taglio inclinato

Nomenclatura aggiuntiva

- *Velocità di taglio*: è la velocità relativa tra la torcia e il pezzo da lavorare.
- *Profondità del kerf*: è la distanza tra le superfici tagliate al bordo di taglio superiore o immediatamente sotto alla zona di fusione.
- *Drag (n)*: è la proiezione della massima distanza tra due punti lungo la direzione di taglio. Vedi figura 2.25.

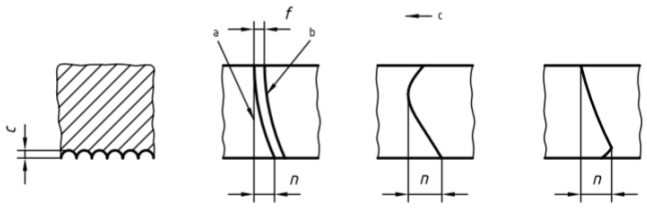


Figure 2.25: Linea di Drag[19]

- *Perpendicolarità o tolleranza angolare*: è la distanza tra due linee parallele tangenti ai due bordi estremi del taglio.

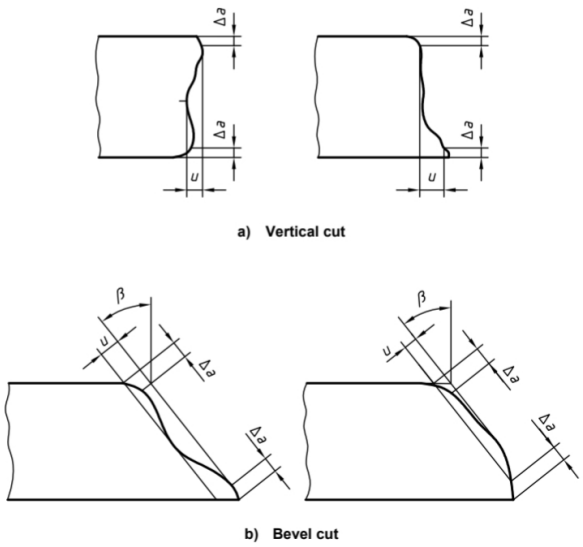


Figure 2.26: Tolleranza di perpendicolarità e tolleranza angolare[19]

- *Altezza del profilo (Z_t)*: è la somma dei valori assoluti dell'altezza della cresta più alta e della valle più profonda.
- *Altezza media del profilo ($Rz5$)*: è la media aritmetica di cinque punti presi su un singolo bordo in modo distanziato.

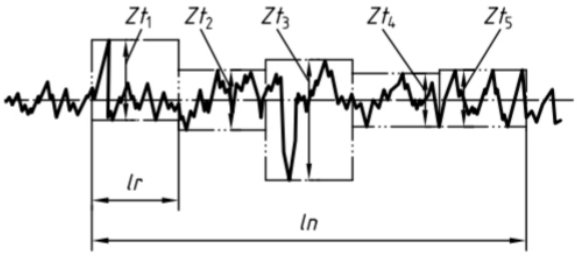


Figure 2.27: Altezza media del profilo ($Rz5$)[19]

- *Arrotondamento del bordo (r)*: è la misura caratteristica dello spigolo superiore del taglio.

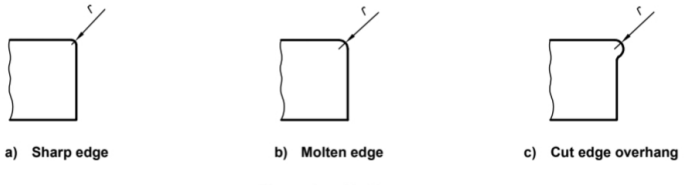


Figure 2.28: Arrotondamento del bordo[19]

- *Gouging*= sono le rugosità e le cricche di forme e spessore irregolari che danneggiano la superficie.

Figure 2.29: Gouging[19]

2.3.2 Determinazione della qualità della superficie di taglio

La norma ISO 9013 impone dei limiti anche sugli strumenti di misura da utilizzare nella misurazione delle grandezze caratteristiche, e in particolare sottolinea che lo strumento utilizzato non deve avere un errore superiore al 20% del valore della grandezza misurata.
In figura 2.30 è possibile osservare l'errore limite tollerato dalla norma in funzione della grandezza misurata.[19]

Symbol	Precision measuring instruments	
	Error limits	Examples
u	0,02 mm	Guide device in the direction of the cut thickness and of the nominal angle with dial gauge Contact stylus point angle $\leqslant 90°$ Contact stylus point radius $\leqslant$ 0,1 mm
$Rz5$	0,002 mm	Precision measuring instrument, e.g. electric contact stylus instrument for continuous scanning in cutting direction
n	0,05 mm	Measuring microscope with crosswires and cross-slide of sufficient adjustability
r	0,05 mm	Special device for scanning the profile of the cut upper edge by a dial gauge
Straightness	0,2 mm	Steel wire with max. 0,5 mm diameter, feeler gauge

Figure 2.30: Tabella descrivente errore limite concesso in base alla grandezza misurata secondo la ISO 9013[19]

Le condizioni di misurazione devono essere condotte su superfici spazzolate, esenti da ossidi e su aree esterne anche nel caso in cui siano presenti delle imperfezioni. Come zona di riferimento bisogna considerare la zona sopra e sotto del pezzo lavorato (essi devono essere puliti).
Per quanto riguarda il numero di misurazioni bisogna considerare la forma, la dimensione e

in taluni casi anche lo scopo.
Il punto di misura deve essere localizzato nel punto di massimo attesto. Inoltre, seguendo questo principio occorre tener presente che il punto possa variare in funzione della misura condotta (altezza, perpendicolarità, inclinazione, etc.). Nel caso in cui il valore riscontrato dalla misurazione si trovasse al limite inferiore del campo di tolleranza, occorrerà ripetere la misurazione in un altro punto a causa dell'incertezza del valore, con l'attesa di trovare un punto con valore superiore. Al contrario nel caso in cui la misurazione fosse nella zona superiore del campo di tolleranza o nel caso in cui ci fossero dubbi sulla misura è necessario ripetere la misura in altri punti del pezzo.
Solitamente, se non specificato, il numero di misurazioni da effettuare sono[19]:

- u (perpendicolarità o inclinazione): due volte tre misure a distanza di 20mm l'una dall'altra.
- *Rz5* (rugosità): una volta ogni metro di taglio.

Per indicare il livello di qualità del taglio si ricorre alla divisione in categorie, dove la 1^a rappresenta il miglior taglio possibile, mentre 5^a il taglio peggiore.
In figura 2.31 è possibile osservare i campi di tolleranza in funzione della categoria di taglio. Nel caso della rugosità le categorie si riducono a 4 come è possibile osservare in figura 2.32.[19]

Range	Perpendicularity or angularity tolerance, u mm
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,4 + 0,01a$
4	$0,8 + 0,02a$
5	$1,2 + 0,035a$

Figure 2.31: Valori del campo di tolleranza in funzione della categoria del taglio per la perpendicolarità e l'inclinazione[19]

Range	Mean height of the profile, $Rz5$ µm
1	10 + (0,6a mm)
2	40 + (0,8 a mm)
3	70 + (1,2a mm)
4	110 + (1,8a mm)

Figure 2.32: Valori del campo di tolleranza in funzione della categoria del taglio per la rugosità[19]

Tolleranze dimensionali

Per quanto riguarda le tolleranze dimensionali lo scostamento limite dal valore nominale è riportato nelle tabelle rappresentate in figura 2.33 (classe 1) e 2.34 (classe 2).[19]

Dimensions in millimetres

Work piece thickness	Nominal dimensions							
	> 0 < 3	⩾ 3 < 10	⩾ 10 < 35	⩾ 35 < 125	⩾ 125 < 315	⩾ 315 < 1 000	⩾ 1 000 < 2 000	⩾ 2 000 < 4 000
	Limit deviations							
> 0 ⩽ 1	± 0,04	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,2	± 0,3	± 0,3	± 0,3
> 1 ⩽ 3,15	± 0,1	± 0,2	± 0,2	± 0,3	± 0,3	± 0,4	± 0,4	± 0,4
> 3,15 ⩽ 6,3	± 0,3	± 0,3	± 0,4	± 0,4	± 0,5	± 0,5	± 0,5	± 0,6
> 6,3 ⩽ 10	—	± 0,5	± 0,6	± 0,6	± 0,7	± 0,7	± 0,7	± 0,8
> 10 ⩽ 50	—	± 0,6	± 0,7	± 0,7	± 0,8	± 1	± 1,6	± 2,5
> 50 ⩽ 100	—	—	± 1,3	± 1,3	± 1,4	± 1,7	± 2,2	± 3,1
> 100 ⩽ 150	—	—	± 1,9	± 2	± 2,1	± 2,3	± 2,9	± 3,8
> 150 ⩽ 200	—	—	± 2,6	± 2,7	± 2,7	± 3	± 3,6	± 4,5
> 200 ⩽ 250	—	—	—	—	—	± 3,7	± 4,2	± 5,2
> 250 ⩽ 300	—	—	—	—	—	± 4,4	± 4,9	± 5,9

Figure 2.33: Valori limite delle tolleranze dimensionali per la classe 1[19]

Dimensions in millimetres

Work piece thickness	Nominal dimensions							
	> 0 < 3	⩾ 3 < 10	⩾ 10 < 35	⩾ 35 < 125	⩾ 125 < 315	⩾ 315 < 1 000	⩾ 1 000 < 2 000	⩾ 2 000 < 4 000
	Limit deviations							
> 0 ⩽ 1	± 0,1	± 0,3	± 0,4	± 0,5	± 0,7	± 0,8	± 0,9	± 0,9
> 1 ⩽ 3,15	± 0,2	± 0,4	± 0,5	± 0,7	± 0,8	± 0,9	± 1	± 1,1
> 3,15 ⩽ 6,3	± 0,5	± 0,7	± 0,8	± 0,9	± 1,1	± 1,2	± 1,3	± 1,3
> 6,3 ⩽ 10	—	± 1	± 1,1	± 1,3	± 1,4	± 1,5	± 1,6	± 1,7
> 10 ⩽ 50	—	± 1,8	± 1,8	± 1,8	± 1,9	± 2,3	± 3	± 4,2
> 50 ⩽ 100	—	—	± 2,5	± 2,5	± 2,6	± 3	± 3,7	± 4,9
> 100 ⩽ 150	—	—	± 3,2	± 3,3	± 3,4	± 3,7	± 4,4	± 5,7
> 150 ⩽ 200	—	—	± 4	± 4	± 4,1	± 4,5	± 5,2	± 6,4
> 200 ⩽ 250	—	—	—	—	—	± 5,2	± 5,9	± 7,2
> 250 ⩽ 300	—	—	—	—	—	± 6	± 6,7	± 7,9

Figure 2.34: Valori limite delle tolleranze dimensionali per la classe 2[19]

3 Descrizione del sistema di taglio utilizzato

Il macchinario utilizzato per la sperimentazione durante il tirocinio è stato il modello *Steel Max* dell'azienda HPM. Tale azienda si occupa in particolare della realizzazione e assemblaggio della macchina, mentre il generatore di plasma, il software di gestione del CNC, il programma per il CAM e l'interfaccia del macchinario sono di terze parti. In particolare, il generatore di plasma è della casa leader nel taglio al plasma su cui si basano anche le scale di qualità analizzate nel precedente capitolo, l'*Hypertherm*, mentre il software di gestione del controllo numerico e di interfaccia sulla macchina è della *Emsis*.
Il programma utilizzato per il CAM e dunque per il nesting dei pezzi in macchina e per la programmazione delle lavorazioni è *CutExpert* dell'azienda *Eurosoft*. Il sistema completo è composto da:

1. Quadro elettrico CNC;
2. Plotter di taglio;
3. Console di comando;
4. Generatore di plasma;
5. Filtro Atex.

3.1 Descrizione della macchina

La macchina **Steel Max** utilizzata è composta dai seguenti componenti:

1. Bancale

Esso è realizzato da una struttura elettrosaldata, composta da due longheroni portanti collegati tra loro da due traverse portanti (una sul lato anteriore e una sul lato posteriore). Sulla parte superiore dei due longheroni del bancale sono fissati, mediante viti, 2 guide lineari di precisione e le cremagliere. Sulle Guide lineari sono montati quattro supporti a sfere per il sostegno del carro (pattini a ricircolo di sfere).[10]
In figura 3.1 è possibile vedere lo schema del bancale.
Nel bancale è montato il *Banco portalamiera*.

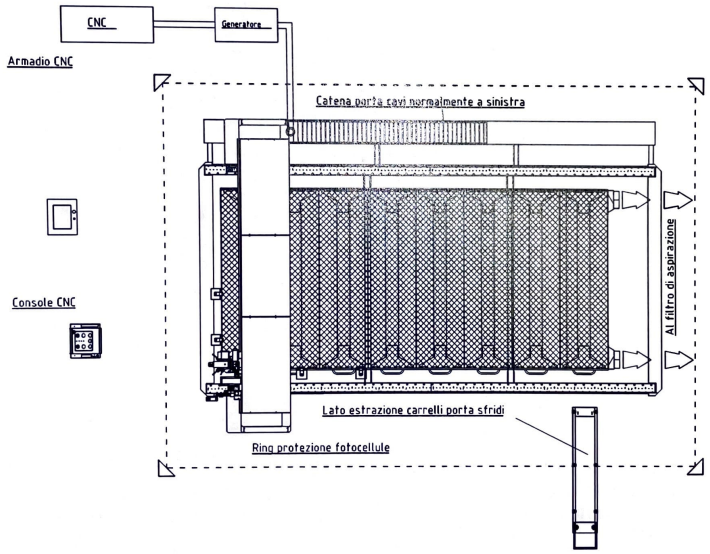


Figure 3.1: Vista in piana del bancale[10]

2. Banco porta lamiera

Esso è costituito da due parti fondamentali: il "grigliato" e la "vasca".

- Grigliato

  Il grigliato permette di appoggiare sul piano di taglio lamiere di dimensioni inferiori al formato massimo consentito dai limiti intensivi della macchina. Nel caso di presenza di *testa foratrice* il grigliato che viene montato è del tipo "a cuspide", ossia possiede delle punte che consentono una più facile operazione di foratura e una durata maggiore del grigliato stesso. Nel caso di sola torcia al plasma viene invece utilizzato il grigliato classico. Essi vanno sostituiti dopo circa 6 mesi di utilizzo.
  In figura 3.2 è possibile vedere la differenza tra i due tipi di grigliati.
  Il grigliato è incassato sul banco, ed è semplicemente appoggiato sul telaio elet-

trosaldato del bancale.
La capacità di taglio del macchinario utilizzato era di 3000 x 1500mm.[10]

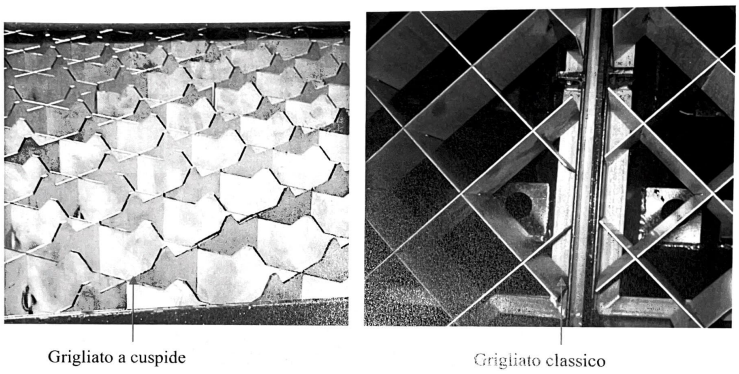


Figure 3.2: Schema tipi di grigliato. A sinistra il grigliato "a cuspide", a destra il grigliato classico "piano"[10]

- Vasca

  La vasca rappresenta un altro elemento molto importante della macchina. È costituita da una struttura autoportante atta a sostenere e aspirare i fumi derivanti dal taglio della lamiera. La vasca deve, inoltre, sopportare le dilatazioni termiche dovute al taglio e le vibrazioni generate dalla foratura tramite testa foratrice, ma essa attraverso la struttura autoportante scarica tutte le sollecitazioni sul pavimento.
  Essa costituisce il polo positivo del circuito di generazione del plasma.
  La vasca è munita di una centrale pneumatica con azionamento a valvole comandato direttamente da CNC, che gestisce i pistoni ad aria lubrificata utilizzati per l'apertura/chiusura delle feritoie laterali per la fuoriuscita dei fumi derivanti dal taglio della lamiera.
  In figura 3.3 è possibile osservare la foto della vasca.[10]

Figure 3.3: Vista della vasca[10]

3. Carro

Il carro è realizzato da una struttura in alluminio che contiene e trasporta tutti gli organi principali di traslazione (motori, moto-riduttori, etc.). Il carro è fissato, con collegamento smontabile, su quattro appoggi a ricircolo di sfere, scorrevoli sulle due guide lineari. Il carro trasla lungo l'asse principale della macchina (o asse X) tramite due motori brushless che muovo i due pignoni che insistono sulle due cremagliere di precisione. La catena cinematica relativa all'asse X è realizzata come schematizzato in figura 3.4.[10]

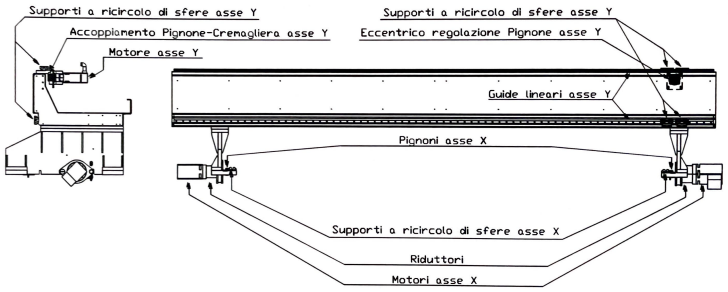


Figure 3.4: Schema del carro[10]

Il carro internamente porta anche gli organi per la trasmissione del moto al gruppo torcia, lungo l'asse Y della macchina, movimento che avviene grazie ad un motore brushless.
La figura 3.5 mostra il funzionamento della movimentazione lungo l'asse Z.

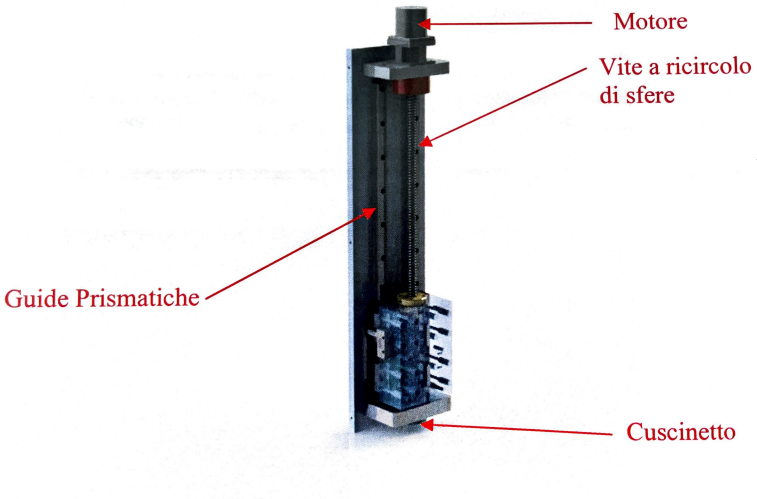


Figure 3.5: Schema di movimentazione asse Z[10]

4. Gruppo torcia

Il gruppo torcia è fissato al carrello che provvede alla movimentazione lungo l'asse Y attraverso un accoppiamento pignone-cremagliera azionato da un motore brushless. Il movimento verticale (asse Z) è affidato anch'esso ad un motore brushless che comanda un sistema a ricircolo di sfere ed è vincolato al moto da guide a ricircolo di sfere.
La torcia costituisce l'utensile per la realizzazione della lavorazione.
Il supporto della torcia è basculante, in modo da prevenire il danneggiamento della torcia stessa in caso di urti accidentali con la lamiera o eventuali oggetti rimasti sul piano di lavoro. Essa, inoltre, è dotata di una copertura in materiale autoestinguibile che filtra i raggi nocivi emessi durante il taglio.
In figura 3.6 è possibile osservare i componenti del gruppo torcia. La figura 3.7 mostra l'esploso del gruppo torcia associato al sistema di movimentazione lungo l'asse Z[10]

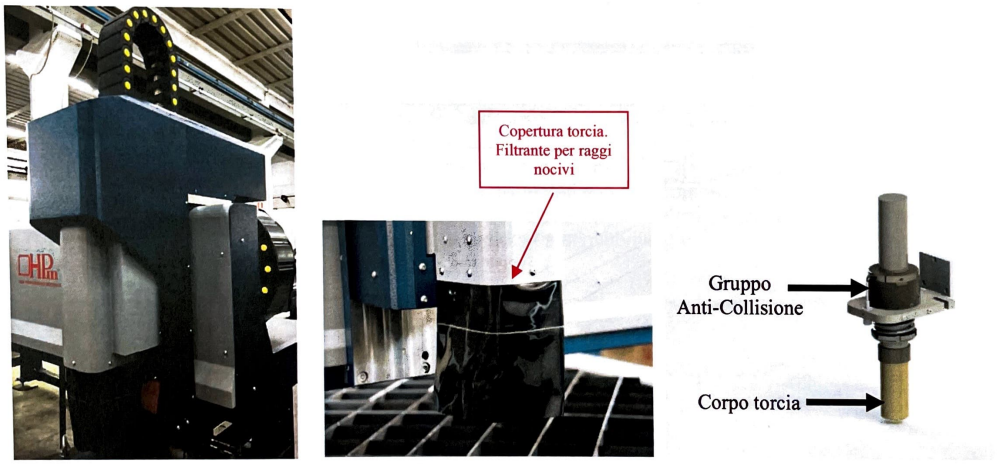


Figure 3.6: Gruppo torcia[10]

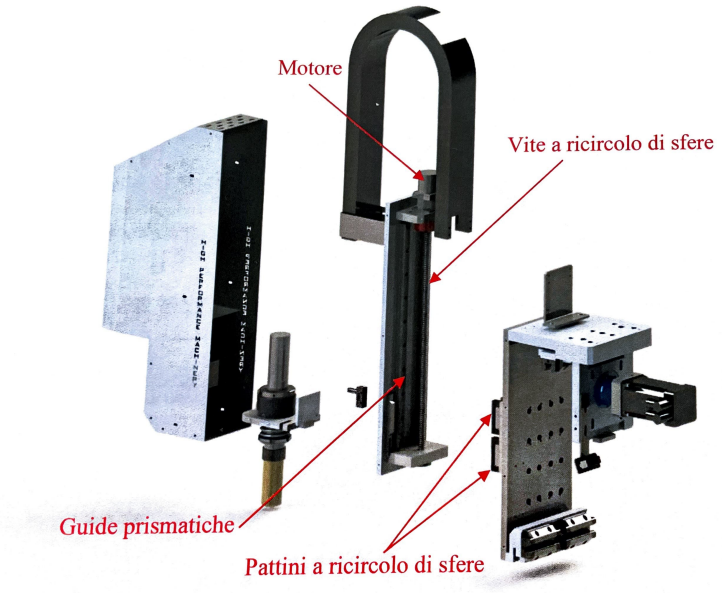


Figure 3.7: Esploso del gruppo torcia con il sistema di movimentazione lungo l'asse Z[10]

5. Testa foratrice

   Essa è montata su una piastra verticale di alluminio (movimentata dall'asse Z) con una vite di manovra e con quattro pattini a ricircolo di sfere che scorrono su apposite guide in modo da realizzare un movimento verticale, che gestisce il corretto posizionamento e la distanza dell'utensile di taglio utilizzato rispetto alla lamiera da lavorare. La motorizzazione lungo l'asse Z è realizzata tramite un motore brushless grazie ad un accoppiamento cinghia-pulegge. Sulla testa della foratrice sono presenti sei mandrini con bloccaggio meccanico manuale che consentono l'inserimento di più tipi di utensili necessari durante la lavorazione. La motorizzazione che consente la rotazione della testa per la selezione dell'utensile desiderato e la motorizzazione dell'utensile stesso son realizzate mediante il medesimo motore Brushless posizionato sopra la testa foratrice stessa.
   Questo motore ha la possibilità di gestire entrambe le suddette procedure grazie ad un comando idraulico di blocco/sblocco della corona Hirt (vedi figura 3.8) all'interno della testa rotante gestito direttamente dal CNC. Essa è dotata, inoltre, di un sistema premi lamiera idraulico che ha il compito di tenere la lamiera ferma durante la lavorazione.
   Essa viene particolarmente usata per creare inviti su lamiere di elevato spessore nel caso in cui non fosse possibile partire da un bordo o spigolo.
   In figura 3.9 è possibile osservare lo schema della testa foratrice.[10]

Figure 3.8: Corona Hirt

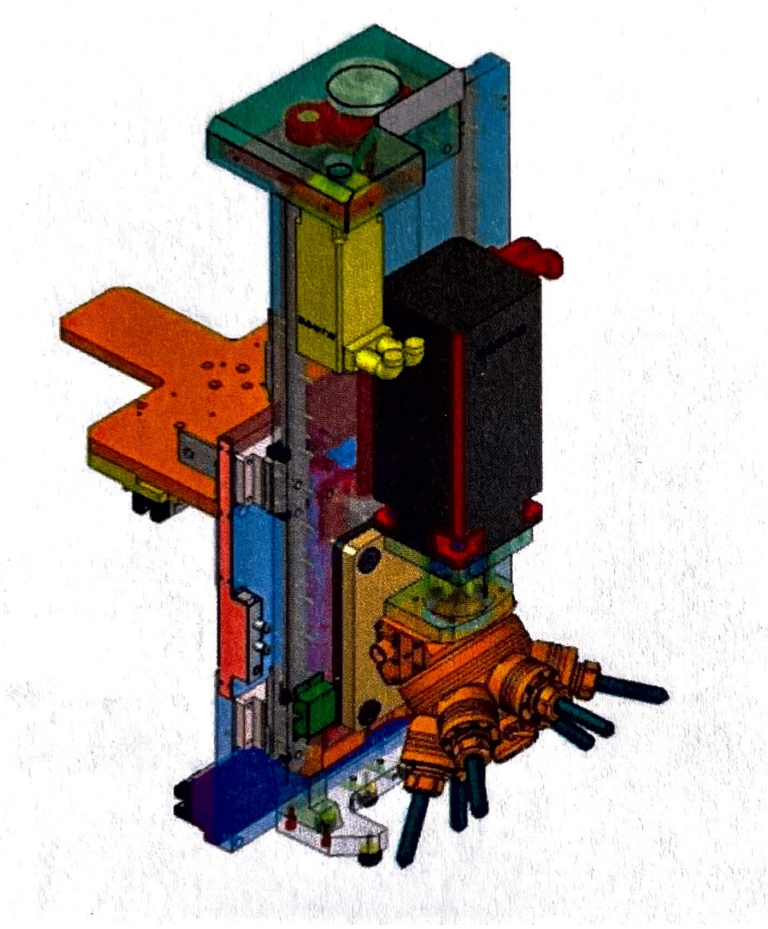


Figure 3.9: Schema della testa foratrice[10]

6. Quadro elettrico

Esso è posizionato vicino alla macchina e contiene al suo interno tutti i cablaggi per il funzionamento dei cinematismi della macchina e della console. Esso prevede le protezioni contro le sovracorrenti, contro i contatti diretti e indiretti, contro le sovratemperature e contro gli archi elettrici. In figura 3.10 è possibile vedere un esempio di quadro elettrico visto dall'esterno mentre in figura 3.11 è possibile osservarlo internamente.[10]

Figure 3.10: Quadro elettrico[10]

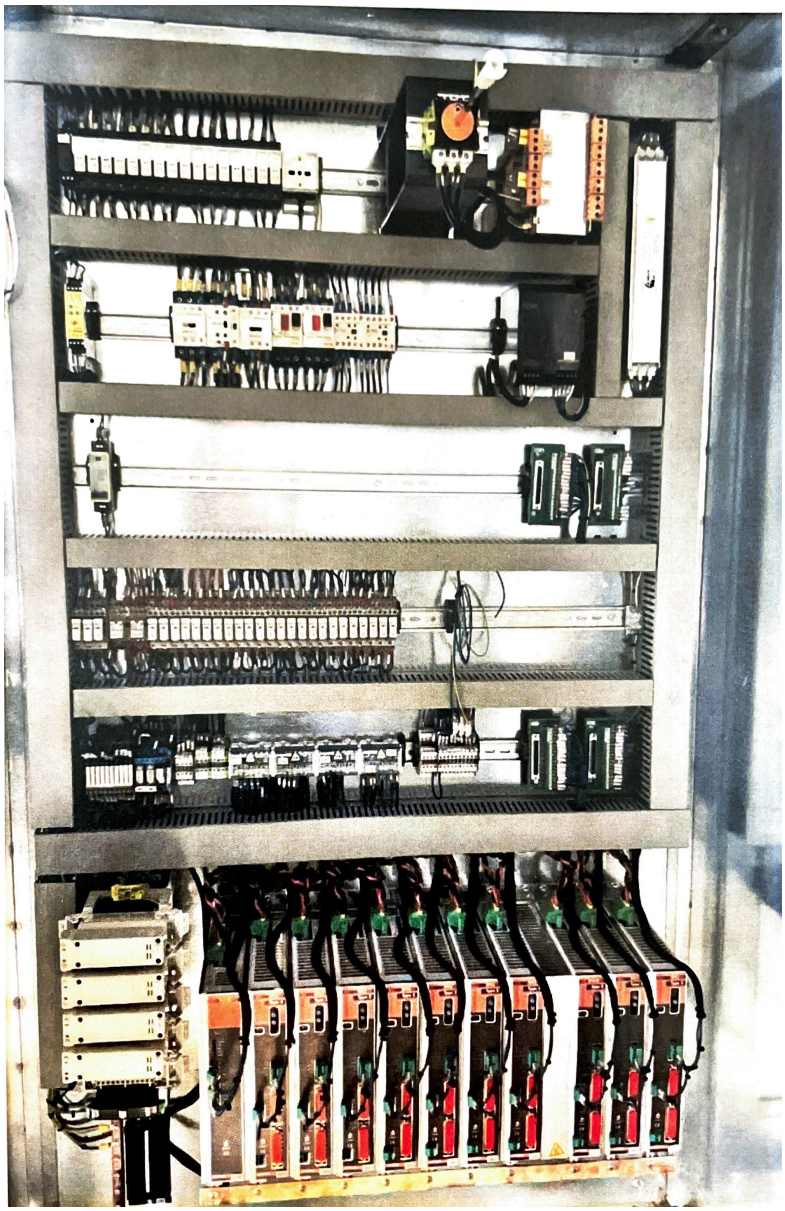


Figure 3.11: Quadro elettrico vista interna[10]

7. Console

Essa è lo strumento attraverso cui è possibile utilizzare la macchina in modalità manuale, ed è necessaria per l'avvio di tutte le lavorazioni (figura 3.12)
È composta da una tastiera intuitiva tramite la quale è possibile avviare o interrompere la lavorazione, muovere gli assi manualmente, e interrompere qualunque processo tramite il fungo di emergenza (figura 3.13)e da uno schermo touchscreen tramite il quale è possibile scegliere le varie lavorazioni e modificare i parametri di taglio principali.[10]

Figure 3.12: Rappresentazione della console[10]

Figure 3.13: Schematizzazione pulsantiera fisica della console[10]

8. Generatore di plasma

Il generatore di plasma utilizzato è il modello *HyPerformance Plasma HPR130XD* prodotto dall'azienda leader nel taglio al plasma, l'*Hyperterm.* Esso è composto da:

- Generatore: Esso eroga una corrente di 130 A con una tensione costante di 150 VCC. Tale generatore è dotato sul lato frontale di un circuito per l'accensione della torcia, dall'altro lato di uno scambiatore di calore con una pompa per la gestione del circuito di raffreddamento, come osservabile in figura 3.14 e 3.15.
  Le dimensioni di questo componente sono P=566mm L=1079mm H=967mm con un peso di 318kg. (vedi figura 3.16)

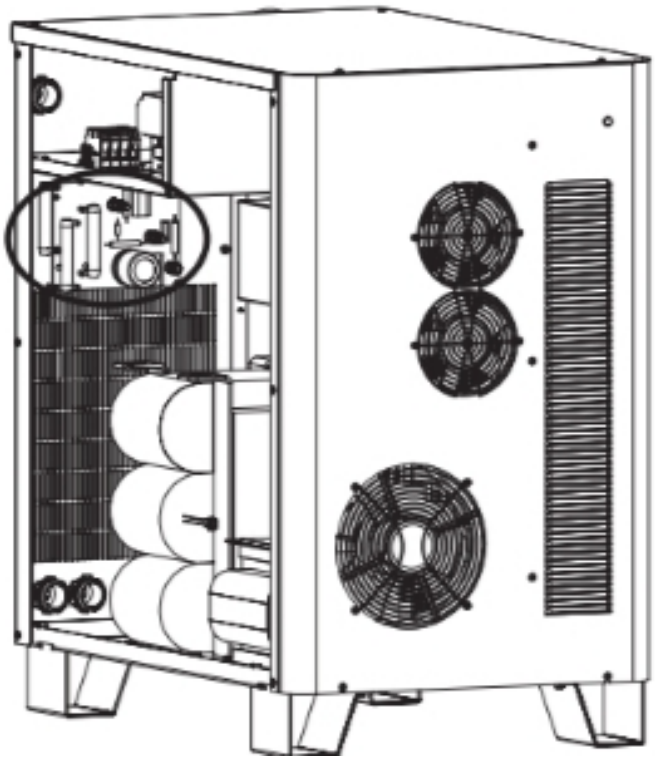


Figure 3.14: Schema lato circuito di accensione della torcia[18]

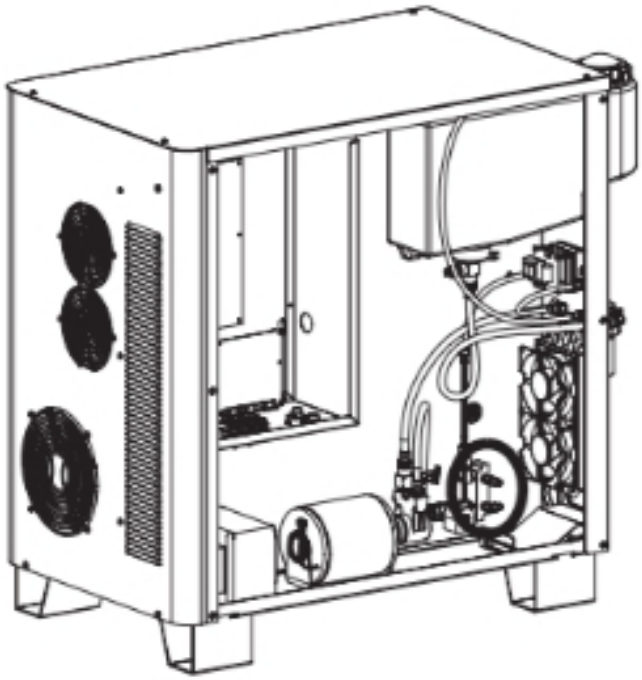


Figure 3.15: Schema lato sistema di raffreddamento[18]

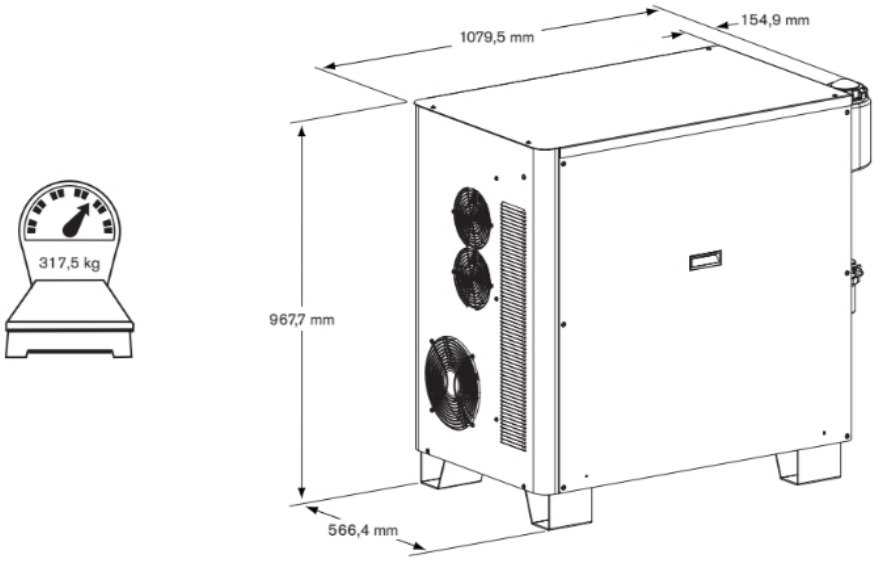


Figure 3.16: Schema dimensioni generatore[18]

- Console di accensione: Essa è dotata di uno spinterometro e converte la tensione di controllo di 120VCA proveniente dal generatore in impulsi ad alta frequenza e ad alta tensione (9-10 kV) per innescare un arco tra l'elettrodo e l'ugello della torcia.

- Gas console: Su di essa è posizionato il tasto di accensione del sistema. Essa consente di gestire la scelta e la portata di tutti i gas in entrata. In figura 3.17

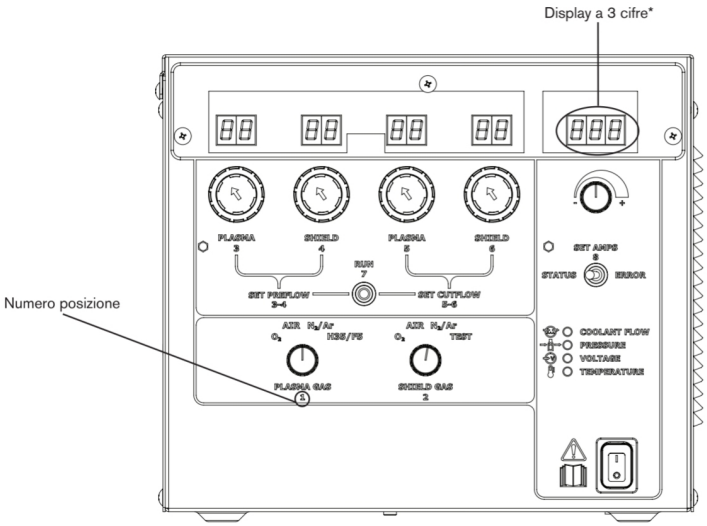


Figure 3.17: Rappresentazione gas console[18]

- Valvola di chiusura: La valvola di chiusura è composta da 5 elettrovalvole, un blocco collettore e un cablaggio con connettore. Il gruppo si interfaccia con la torcia della macchina, la console di accensione e la console del gas.

- Torcia: Essa come visto in precedenza è composta da diversi componenti, che sono (vedi figura 3.18): la base della torcia (essa viene collegata tramite i cavi torcia al generatore di plasma), anello di corrente, elettrodo, anello diffusore, ugello, cappuccio di tenuta dell'ugello, schermo, cappuccio di protezione.
  Per quanto riguarda la torcia utilizzata (Hydefinition) essa possiede come capacità massima di sfondamento 32mm per l'acciaio al carbonio e 19mm per l'acciaio inox e l'alluminio, mentre come capacità massima di separazione 38mm per l'acciaio al carbonio e 25 mm per l'acciaio inox e l'alluminio.

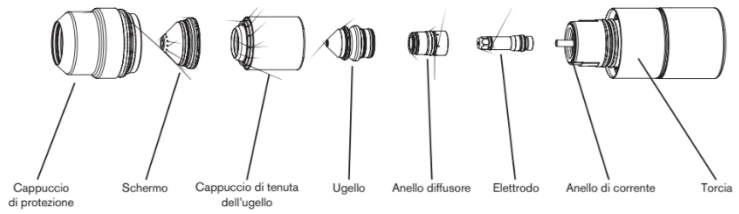


Figure 3.18: Schema dei componenti della torcia[18]

In figura 3.19 è possibile osservare il sistema completo di collegamenti con il generatore di plasma.
Esso è composto principalmente da tre macroaree distinte: la prima è quella delle bombole dei gas (plasma e protezione) con relativi riduttori di pressione con manometri a basse pressioni, la seconda è quella del generatore di plasma, e la terza è quella del macchinario per il taglio.

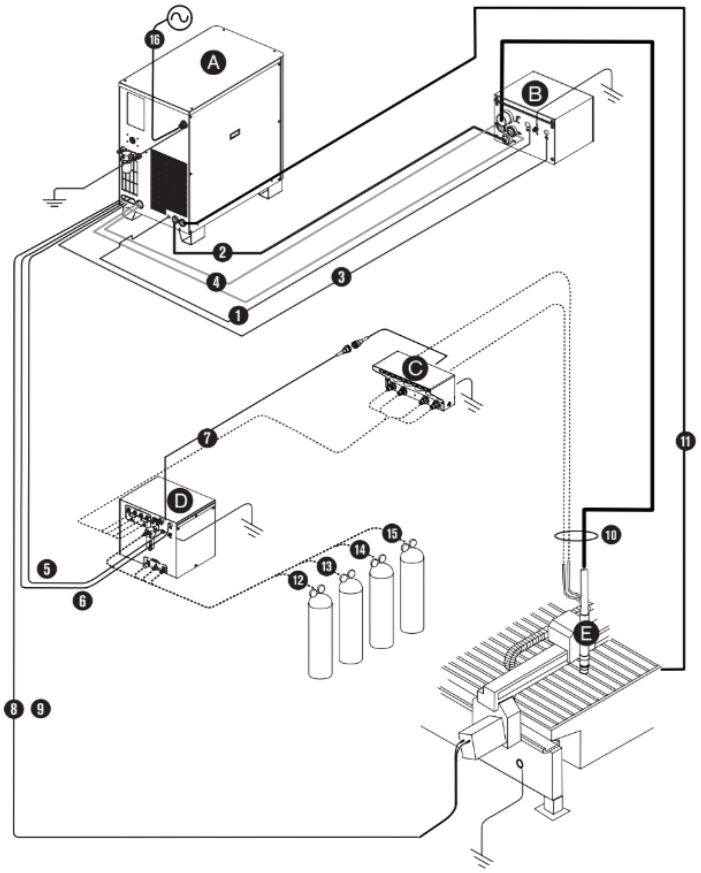


Figure 3.19: Schema collegamenti tra i componenti per il taglio al plasma[18]

In tale schema i principali componenti sono:

- A: Generatore di plasma
- B: Gas console
- C: Gruppo valvola di chiusura
- D: Gas console
- E: Torcia

Si riportano qui di seguito, in figura 3.20 e 3.21, le tabelle con le caratteristiche tecniche del generatore, e le caratteristiche dei gas utilizzati per il taglio.

Generatore

Generalità							
Massima tensione a circuito aperto OCV (U_0)		311 VCC					
Corrente massima erogata (I_2)		130 A					
Tensione di uscita (U_2)		50 – 150 VCC					
Ciclo di lavoro (X)		100% a 19,5 kW, 40 °C					
Temperatura ambiente/ciclo di lavoro		Gli alimentatori elettrici opereranno tra −10 °C e +40 °C					
Fattore di alimentazione (cosφ)		0,88 a 130 ACC in uscita					
Raffreddamento		Ventilazione forzata (classe F)					
Isolamento		Classe H					
Codici articolo di generatore		**Tensione di alimentazione CA (U_1)**	**Fase**	**Frequenza (Hz)**	**Corrente (I_1)**	**Approvazione normativa**	**Alimentazione kVA (+/− 10%) (U_1 x I_1 x 1,73)**
Senza Hypernet	**Con Hypernet**						
078538	078546	200/208	3	50/60	62/60	CSA	21,5
078539	078547	220	3	50/60	57	CSA	21,5
078540	078548	240	3	60	52	CSA	21,5
078541	078549	380*	3	50/60	33	CCC	21,5
078542	078550	400	3	50/60	32	CE/GOST-R	21,5
078603	078604	415	3	50/60	32	CE/GOST-R	21,5
078543	078551	440	3	50/60	28	CSA	21,5
078544	078552	480	3	60	26	CSA	21,5
078545	078553	600	3	60	21	CSA	21,5

* L'approvazione normativa 380 V CCC si applica solo al funzionamento a 50 Hz

Figure 3.20: Tabella delle caratteristiche tecniche del generatore[18]

Requisiti di qualità e pressione del gas			
Tipo di gas	**Qualità**	**Pressione +/− 10%**	**Portata**
O_2 ossigeno	Puro al 99,5% Pulito, secco, senza olio	793 kPa / 8 bar	4250 l/h
N_2 azoto	Puro al 99,99% Pulito, secco, senza olio	793 kPa / 8 bar	7080 l/h
Aria	* Pulita, secca, senza olio come da ISO 8573-1 Classe 1.4.2	793 kPa / 8 bar	7080 l/h
H35 argon-idrogeno	Puro al 99,995% (H35 = 65% argon, 35% idrogeno)	793 kPa / 8 bar	4250 l/h
F5 azoto-idrogeno	Puro al 99,98% (F5 = 95% azoto, 5% idrogeno)	793 kPa / 8 bar	4250 l/h
Ar argon	Puro al 99,99% Pulito, secco, senza olio	793 kPa / 8 bar	4250 l/h

Figure 3.21: Tabella requisiti sui gas utilizzati[18]

3.2 Plasma interface (Emsis)

Il plasma interface è l'interfaccia software, elaborata dalla Emsis, presente all'interno della

console, e, dunque, cuore pulsante nel funzionamento del sistema a controllo numerico.

Come è possibile vedere in figura 3.22 la pagina principale si divide in 3 parti: la parte di sinistra è quella relativa alla modifica dei parametri di taglio come la tensione d'arco (necessaria per regolare l'altezza della torcia durante il taglio tramite il sistema THC), velocità di lavoro (prevenire formazioni di bave e tagli di scarsa qualità), altezza di sfondamento, altezza di lavoro (solo in condizioni di Z costante, altrimenti si agirebbe sulla tensione d'arco), e la velocità in percentuale dell'asse Z (nel caso di lamiere particolarmente deformate si aumenta la risposta del sistema lungo l'asse Z per evitare collisioni tra la torcia e la lamiera); la parte centrale è quella di visualizzazione grafica della lavorazione e della disposizione dei tagli sulla lamiera; la parte di destra è dedicata nella sua parte medio-alta alla visualizzazione delle informazioni restituite dalla macchina, mentre la parte in basso è necessaria per l'azzeramento prima di iniziare la lavorazione.

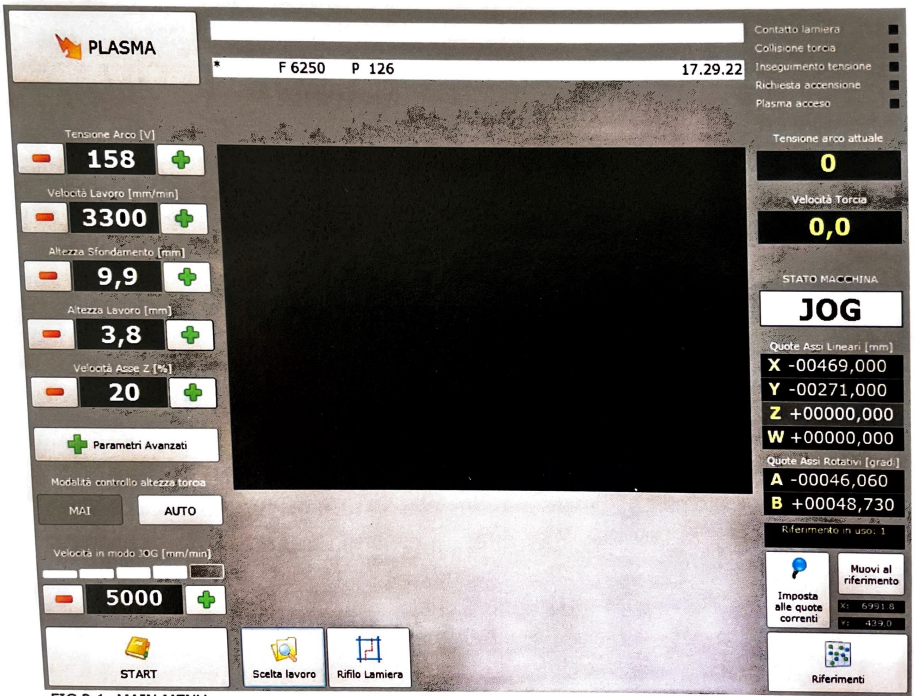


Figure 3.22: Pagina principale del plasma interface (Emsis)[7]

In questo ambiente è possibile selezionare i programmi da eseguire.
Come si vede in figura 3.23 in alto a sinistra è possibile selezionare il drive, sotto è possibile navigare tra le cartelle mentre a destra verrà mostrato l'elenco dei programmi trovati.

Figure 3.23: Pagina scelta lavori plasma interface (Emsis)[7]

Quando si seleziona un programma si entra nella pagina per la scelta della tecnologia di taglio. Essa nel caso di programma CAM è già preimpostata, ma può essere modificata manualmente in caso di errori.
I parametri modificabili sono: materiale (ferro, acciaio, alluminio)[1], lo spessore (da 0,5 a 80mm), la corrente (parametro dipendente dagli inserti utilizzati nella torcia), e il tipo di gas. La schermata sopra descritta è osservabile in figura 3.24.

[1] Per ferro si intendono gli acciai basso legati i "mild steel", mentre per acciaio si intendono gli acciai *inox* (compresi quelli austenitici)

Figure 3.24: Schermata scelta dei parametri tecnologici[7]

3.3 CutExpert (Eurosoft)

È il programma CAM utilizzato per creare i file ISO da utilizzare in macchina, durante il tirocinio e la fase di sperimentazione. Prima di utilizzarlo è necessario creare un disegno su un programma CAD in 2D (poiché la lavorazione di taglio si sviluppa solo in due dimensioni) ed esportarlo in formato .DWG o.DXF. Il file creato sarà ora utilizzabile sul programma Cutexpert. In figura 3.25 è possibile vedere la schermata iniziale del software. In seguito, sarà necessario effettuare il caricamento del file all'interno del software, ma prima si dovrà creare una commessa con il nome della lavorazione (o del pezzo) definendo alcuni parametri (vedi figura 3.26): numero di pezzi, materiale da tagliare e spessore della lamiera.
Il passo successivo è quello del nesting in lamiera, ovvero la localizzazione dei pezzi all'interno della lamiera (vedi figura 3.27) (esso può essere svolto sia in modalità manuale che automatica).
Avendo svolto le precedenti fasi si giunge al punto in cui si può lavorare direttamente sui parametri di taglio legati principalmente ai percorsi effettuati dalla torcia durante il taglio (essi verranno analizzati in maniera più approfondita nel seguente capitolo) in modo da ottimizzare i tempi e migliorare la qualità del taglio.
Esso si presenta come un software particolarmente intuitivo e molto versatile.

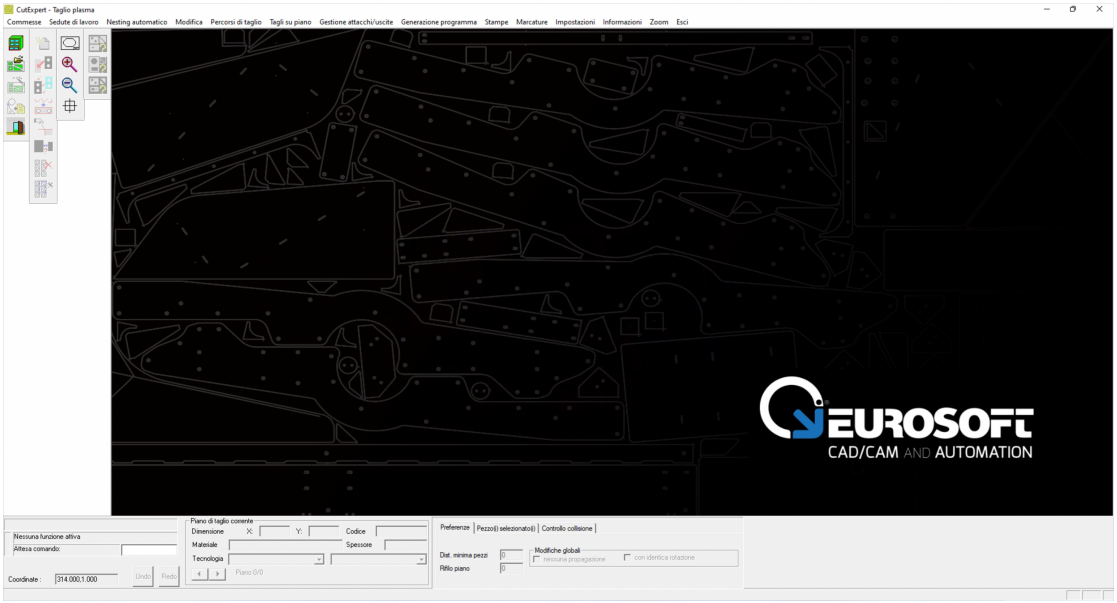


Figure 3.25: Schermata principale CutExpert (Eurosoft)

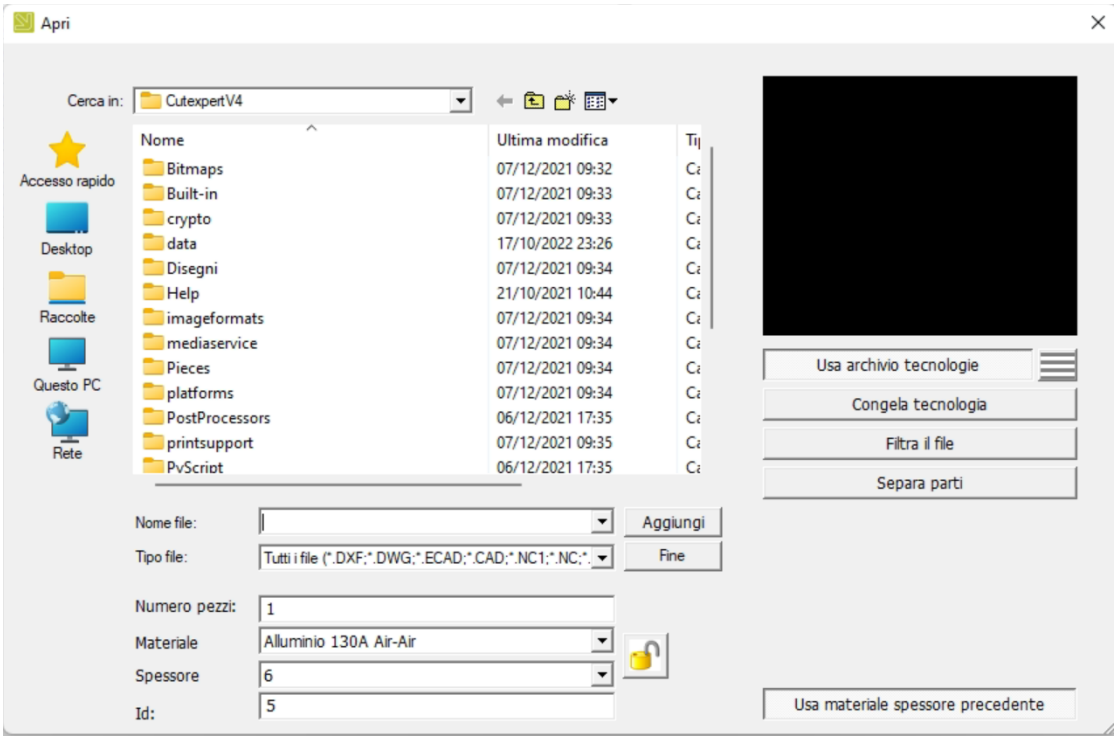


Figure 3.26: Schermata scelta dei parametri nella creazione di una commessa

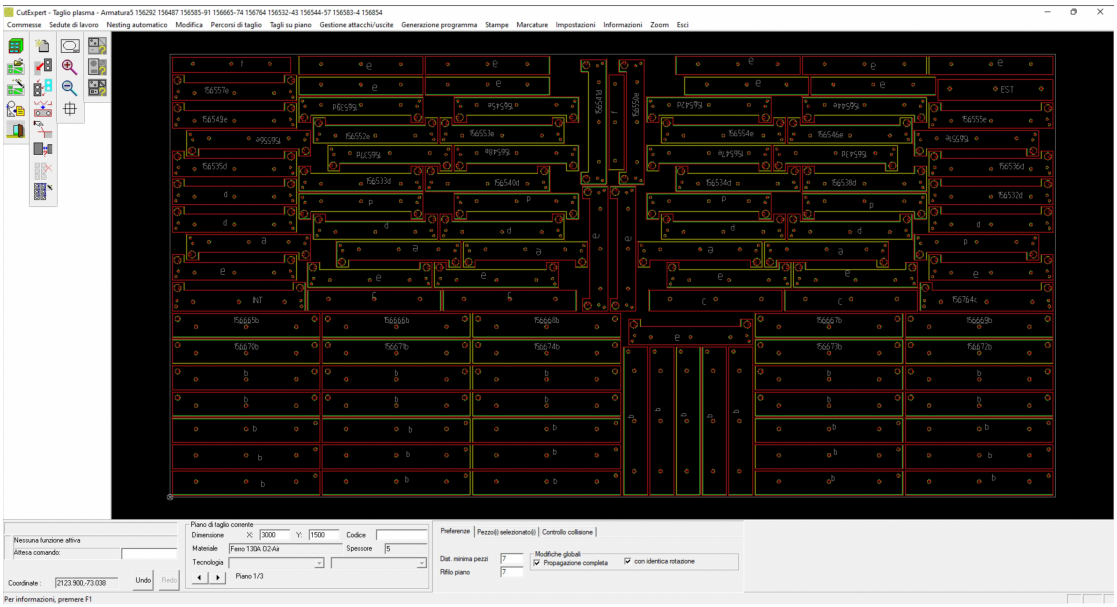


Figure 3.27: Schermata di nesting dei pezzi in lamiera

4 Ottimizzazione dei parametri di taglio

L'ottimizzazione dei parametri nel taglio al plasma è particolarmente complessa poiché in esso, come visto nei capitoli precedenti, intervengono numerosi fattori non completamente indipendenti gli uni dagli altri.
L'obiettivo era quello di riuscire ad ottenere il taglio più veloce, più economico (che preservasse nel miglior modo i consumabili) e della miglior qualità possibile.
L'aspetto di preservazione dei consumabili è quello di maggior importanza in ambito industriale, poichè esso determina la maggior parte del costo della lavorazione. Inizialmente la vita dei consumabili era limitata a pochi inneschi, ma con il progredire della tecnica e degli studi condotti si è arrivati ad un valore di circa 600-1000 inneschi, che possono arrivare fino a 1500-1800 nel caso della tecnologia ®LongLife brevettata dall'*Hyperterm*.
Tutta la sperimentazione è stata condotta, per gli scopi sopra elencati, lavorando quasi solo ed esclusivamente su 3 parametri, tralasciando qualunque tipo di sperimentazione di natura costruttiva, che sono:

1. Velocità di taglio;
2. Pressioni e tipo di gas;
3. Corrente.

I primi due sono in assoluto quelli che incidono maggiormente nella qualità del taglio mentre per quanto riguarda la corrente è stata pressocché in ogni caso mantenuta al valore di progetto.
I valori iniziali sono stati presi dalle tabelle fornite dall'azienda produttrice del generatore di plasma la *Hyperterm*.
Per quanto riguarda i componenti interni alla torcia, sono stati sempre utilizzati quelli consigliati (originali) nelle combinazioni consigliate, poiché l'utilizzo di inserti errati e/o non

conformi avrebbe potuto compromettere il funzionamento del macchinario (essi fanno riferimento a sperimentazioni molto più complesse e strutturate). I materiali testati sono stati:

MATERIALE	CORRENTE	SPESSORE	GAS DI PLASMA	GAS PROTEZIONE
Acciaio al carbonio	30 A	2mm	O_2	O_2
Acciaio al carbonio	30 A	3mm	O_2	O_2
Acciaio al carbonio	80 A	3mm	O_2	Aria
Acciaio al carbonio	80 A	4mm	O_2	Aria
Acciaio al carbonio	80 A	5mm	O_2	Aria
Acciaio al carbonio	80 A	6mm	O_2	Aria
Acciaio al carbonio	80 A	8mm	O_2	Aria
Acciaio al carbonio	80 A	10mm	O_2	Aria
Acciaio al carbonio	130 A	4mm	O_2	Aria
Acciaio al carbonio	130 A	5mm	O_2	Aria
Acciaio al carbonio	130 A	6mm	O_2	Aria
Acciaio al carbonio	130 A	8mm	O_2	Aria
Acciaio inox	45A	1mm	N_2	N_2
Acciaio inox	45A	2mm	N_2	N_2
Acciaio inox	45A	4mm	N_2	N_2
Acciaio inox	130A	6mm	N_2	N_2
Acciaio inox	130A	8mm	N_2	N_2
Alluminio	130 A	6mm	Aria	Aria
Alluminio	130 A	8mm	Aria	Aria

4.1 Tabelle parametri di taglio e componenti della torcia

Durante la fase di ottimizzazione è fondamentale l'utilizzo di valori standardizzati, che possano fornire un caposaldo da cui partire per cercare di ottenere una qualità di taglio migliore per il materiale specifico che si sta trattando.
Per fare ciò i valori utilizzati, nel mio caso, sono quelli consigliati dal produttore del generatore di plasma.
Di seguito, si riportano le tabelle fornite dall'Hyperterm con i valori utilizzati nella sperimentazione del taglio dei materiali elencati nella tabella soprastante:

Acciaio al carbonio

Plasma a O_2 / protezione O_2

30 A

Portata – l/min / scfh		
	O_2	Aria
Pre-flusso	0 / 0	46 / 97
Flusso di taglio	22 / 46	0 / 0

Nota: l'aria deve essere collegata per poter utilizzare questo processo. Viene utilizzata come gas di pre-flusso.

220747 220194 220754 220193 220180 220192 220340

Metrico

Selezione gas		Impostazione pre-flusso		Impostazione flusso di taglio		**Spessore del materiale**	Tensione d'arco	Distanza tra torcia e lamiera	Velocità di taglio	Altezza iniziale di sfondamento		Ritardo di sfondamento
Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	mm	V	mm	mm/m	mm	% fattore	secondi
O_2	O_2	80	15	92	15	**0,5**	114	1,3	5355	2,3	180	0,1
						0,8	115		4225			0,2
						1	116		3615			0,3
						1,2	117		2865			
						1,5	119		2210			
			35		5	**2**	120	1,5	1490	2,7		0,4
						2,5	122		1325			
			75			**3***	123		1160			0,5
						4*	125		905			0,7
						6*	128		665			1,0

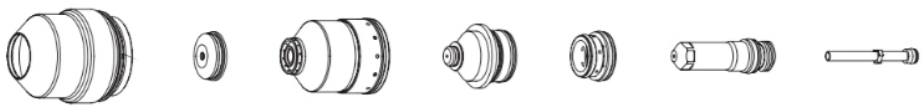
Figure 4.1: Tabella parametri di taglio acciaio al carbonio 30A

Acciaio al carbonio

Plasma a O_2 / protezione aria

80 A

Portata – l/min / scfh		
	O_2	Aria
Pre-flusso	0 / 0	76 / 161
Flusso di taglio	23 / 48	41 / 87



220747 220189 220756 220188 220179 220187 220340

Metrico

Selezione gas		Impostazione pre-flusso		Impostazione flusso di taglio		**Spessore del materiale**	Tensione d'arco	Distanza tra torcia e lamiera	Velocità di taglio	Altezza iniziale di sfondamento		Ritardo di sfondamento
Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	mm	V	mm	mm/m	mm	% fattore	secondi
O_2	Aria	50	30	72	30	**2**	112	2,5	9810	3,8	150	0,1
						2,5	115		7980			
						3	117		6145			0,2
						4	120	2,0	4300	4,0	200	
						5	121		3670			0,3
						6	123		3045			
						8	125		2430			0,4
						10	127		1810			0,5
					15	**12**	130		1410	5,0	250	0,7
						15	133		1030			0,8
						20	135	2,5	545	6,3		0,9

Figure 4.2: Tabella parametri di taglio acciaio al carbonio 80A

Acciaio al carbonio

Plasma a O_2 / protezione aria

130 A

Portata – l/min / scfh		
	O_2	Aria
Pre-flusso	0 / 0	102 / 215
Flusso di taglio	33 / 70	45 / 96

220747 220183 220756 220182 220179 220181 220340

Metrico

Selezione gas		Impostazione pre-flusso		Impostazione flusso di taglio		**Spessore del materiale**	Tensione d'arco	Distanza tra torcia e lamiera	Velocità di taglio	Altezza iniziale di sfondamento		Ritardo di sfondamento
Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	mm	V	mm	mm/m	mm	% fattore	secondi
O_2	Aria	35	40	80	35	**3**	124	2,5	6505	5,0	200	0,1
						4	126	2,8	5550	5,6		0,2
						5			4795			0,3
						6	127		4035			
					28	**8**	129	3,0	3360	6,0		
						10	130		2680			
						12	132	3,3	2200	6,6		0,5
						15	135	3,8	1665	7,6		0,7
						20	138		1050			1,0
			65			**25**	141	4,0	550		190	1,8
						32	160	4,5	375	Partenza dal bordo		
						38	167		255			

Figure 4.3: Tabella parametri di taglio acciaio al carbonio 130 A

Acciaio inox

Plasma a N_2 / protezione a N_2

45 A

Portata – l/min / scfh	
	N_2
Pre-flusso	24 / 51
Flusso di taglio	75 / 159

220747 220202 220755 220201 220180 220308 220340

Metrico

Selezione gas		Impostazione pre-flusso		Impostazione flusso di taglio		**Spessore del materiale**	Tensione d'arco	Distanza tra torcia e lamiera	Velocità di taglio	Altezza iniziale di sfondamento		Ritardo di sfondamento
Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	mm	V	mm	mm/m	mm	% fattore	secondi
N_2	N_2	35	5	55	60	**0,8**	94	2,5	6380	3,8	150	0,0
						1			5880			0,1
						1,2			5380			0,2
						1,5	95		4630			
						2	97		3935			
						2,5	101		3270			
						3	103		2550			0,3
						4			1580			

Figure 4.4: Tabella parametri di taglio acciaio inox 45 A

Acciaio inox

Plasma a N_2 / protezione a N_2

130 A

Portata – l/min / scfh	
	N_2
Pre-flusso	97 / 205
Flusso di taglio	79 / 168

220747 220198 220756 220197 220179 220307 220340

Metrico

Selezione gas		Impostazione pre-flusso		Impostazione flusso di taglio		**Spessore del materiale**	Tensione d'arco	Distanza tra torcia e lamiera	Velocità di taglio	Altezza iniziale di sfondamento		Ritardo di sfondamento
Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	**mm**	V	mm	mm/m	mm	% fattore	secondi
N_2	N_2	20	65	70	30	**6**	153	3,0	1960	6,0	200	0,3
						8	155		1630			0,4
						10	156		1300			0,5
						12	162	3,5	900	7,0		0,8
						15	167	3,8	670	Partenza dal bordo		
						20	176	4,3	305			

Figure 4.5: Tabella parametri di taglio acciaio inox 130 A

Alluminio

Plasma ad aria / protezione ad aria

45 A

Portata – l/min / scfh	
	Aria
Pre-flusso	45 / 95
Flusso di taglio	78 / 165

220747 220202 220756 220201 220180 220308 220340

Metrico

Selezione gas		Impostazione pre-flusso		Impostazione flusso di taglio		**Spessore del materiale**	Tensione d'arco	Distanza tra torcia e lamiera	Velocità di taglio	Altezza iniziale di sfondamento		Ritardo di sfondamento
Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	**mm**	V	mm	mm/m	mm	% fattore	secondi
Aria	Aria	35	25	55	60	**1,2**	130	2,5	4750	3,8	150	0,2
						1,5	115		4160			
						2	113		3865			
						2,5	110		3675			
						3	107		2850			
					40	**4**	102	1,8	2660	2,7		0,3
						6	117	3,0	1695	4,5		0,6

Figure 4.6: Tabella parametri di taglio alluminio 45 A

Alluminio

Plasma ad aria / protezione ad aria

130 A

Portata – l/min / scfh	
	Aria
Pre-flusso	73 / 154
Flusso di taglio	78 / 165

220747 220198 220756 220197 220179 220181 220340

Metrico

Selezione gas		Impostazione pre-flusso		Impostazione flusso di taglio		**Spessore del materiale**	Tensione d'arco	Distanza tra torcia e lamiera	Velocità di taglio	Altezza iniziale di sfondamento		Ritardo di sfondamento
Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	Gas plasma	Gas di protezione	mm	V	mm	mm/m	mm	% fattore	secondi
Aria	Aria	20	40	70	30	**6**	153	2,8	2370	5,6	200	0,2
						8	154	3,0	1920	6,0		0,3
						10	154		1465			
						12	156		1225			0,5
						15	158	3,3	1050	6,6		0,8
						20	162	3,5	725	7,0		1,3
						25	172	4,0	525	N/D		

Figure 4.7: Tabella parametri di taglio alluminio 45 A

4.2 Velocità di taglio

La velocità di taglio è il parametro più importante nella fase di taglio, poiché da esso dipende la qualità della superficie finale.
Com'è possibile vedere nelle tabelle sopra riportate l'Hyperterm fornisce valori netti di velocità ottenuti dall'interpolazioni di numerosi dati ottenuti durante la loro fase di sperimentazione, ma non sempre il valore è corretto per ottenere il miglior risultato.
La velocità relativa tra torcia e pezzo deve oscillare tra 2 valori limite che definiremo come V_{max} e V_{min}, identificando con V_{max} la massima velocità della torcia oltre la quale il taglio non avviene, mentre con V_{min} la velocità più bassa attribuibile alla torcia sotto la quale il risultato del taglio compromette non solo la qualità della superficie ma anche quella dimensionale (ISO9013).
Il valore della velocità massima non è così semplice da determinare, poiché essa è dipendente dal materiale tagliato (in campo industriale ogni lamiera possiede composizioni chimiche), dallo spessore tagliato (lamiere di scarsa qualità hanno, addirittura, una tolleranza di +/- 0,5 mm all'interno della stessa), e dalla geometria dell'ugello (come detto in precedenza questo parametro verrà considerato una costante).
Aumentando essa rispetto alla velocità di progetto , che come accennato è un valore medio tra la V_{max} e la V_{min}, con incrementi di circa 50mm/min, prima di arrivare al punto in cui

la fiamma non è più in grado di penetrare completamente la lamiera, fatto estremamente pericoloso per l'integrità della macchina, poiché il metallo fuso non viene più espulso nella parte sottostante dal gas di protezione ma viene spruzzato sul gruppo torcia e sul sistema di movimentazione dell'asse Z, il materiale fuso non riesce a fluire in toto oltre il pezzo ma in parte rimane attaccato al bordo di taglio generando una bava definita *bava da alta velocità*. Essa è generalmente più sottile rispetto a quella generata dalle basse velocità, e caratterizzata da una forma a denti di sega inclinati nella direzione di taglio (vedi figura 4.8), con la possibile presenza di uno spigolo inclinato sul bordo di uscita dovuto alla mancanza di totale penetrazione.
È il tipo di bava più difficile da togliere, e necessità di lavorazione meccaniche successive per essere rimossa.
Per risolvere il problema occorre:

- Diminuire la velocità di taglio con decrementi di 25mm/min;
- Diminuire la distanza torcia lamiera con decrementi di 5V sulla tensione d'arco;
- Aumentare l'intensità della corrente (prestando attenzione al fenomeno del doppio arco).

Solitamente abbassando la velocità il taglio migliora, ma solo nel caso in cui non si arrivi a velocità troppo basse, nel qual caso si presenta il fenomeno della bava, definita *bava da bassa velocità*. Il fenomeno si crea poiché viene a mancare il "sostegno" della superficie di taglio nei confronti della colonna di plasma, la quale inizia a cercare nuovo materiale espandendosi. Questa espansione comporta un doppio problema: il primo riguarda l'aumento di materiale eroso con una diminuzione di precisione dimensionale del taglio, il secondo è dovuto ad un aumento locale della temperatura che fonde il materiale circostante creando una bava spessa tipica di una fusione (vedi figura 4.8). Anche utilizzare una tensione d'arco troppo bassa (distanza torcia-lamiera bassa) o un'intensità di corrente troppo elevata può causare il fenomeno di bava da bassa velocità. Essa si presenta, in particolar modo, in presenza di spigoli o bassi raggi di curvatura, poiché avviene il rallentamento della torcia per effettuare il cambio di direzione.

- Aumentare la velocità di taglio con incrementi di 25mm/min;
- Aumentare la distanza torcia lamiera con incrementi di 5V sulla tensione d'arco;
- Ridurre l'intensità della corrente con incrementi di 10 A.

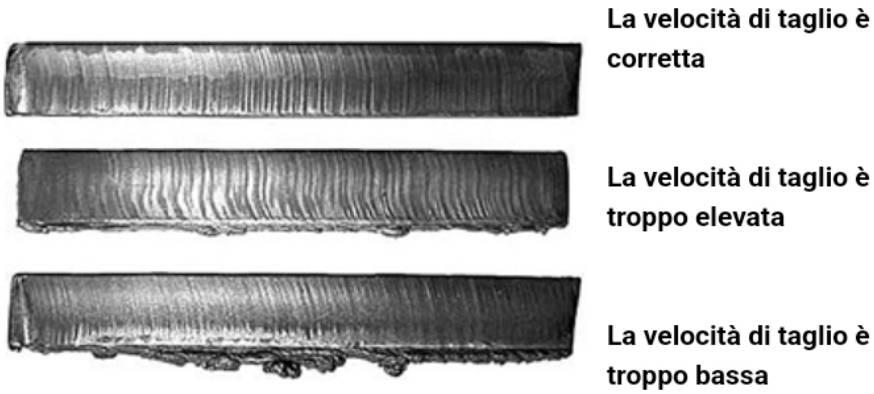


Figure 4.8: Tipi di bave dovute alle diverse velocità di taglio (Hyperterm)

4.3 Gas di plasma e protezione

Nel taglio al plasma vengono comunemente utilizzati due gas insieme. Il primo, definito *gas di plasma o primario*, è il gas che viene ionizzato dall'arco elettrico generando il flusso di plasma, mentre il secondo è definito *gas di protezione o secondario* ed ha sia il compito di proteggere il gruppo torcia espellendo il materiale fuso durante il taglio, sia quello di stabilizzare il flusso della colonna di plasma.
Generalmente i gas più utilizzati come gas di plasma sono[16]:

- **Ossigeno**
  Esso viene utilizzato per il taglio degli acciai al carbonio (*mild steel*), poiché grazie ad esso è possibile ottenere la migliore qualità associata alla velocità di taglio più elevata. Questo è dovuto al fatto che la reazione tra il gas O_2 e il metallo fuso genera gocce con una bassa tensione superficiale che vengono espulse molto facilmente dal gas di protezione (viene quasi sempre utilizzata l'aria). L'unico problema dell'utilizzo dell'ossigeno come gas plasmogeno è che comporta un rapido degrado dei consumabili, sebbene con il sistema ®LongLife si possano tranquillamente raggiungere valori di durata superiori ai 1800 inneschi.

- **Azoto**
  Esso viene utilizzato nel taglio di acciaio inox (*Stainless Steel*) e alluminio. L'utilizzo di questo gas offre la miglior durata dei consumabili possibile, anche dopo i 1500 inneschi (limite per i sistemi a ossigeno) essi sono ancora estremamente prestanti e il taglio sembra non risentirne. L'unico limite è quello dello spessore, poiché oltre i 15mm di

spessore è conveniente utilizzare una miscela H35 per avere un taglio migliore, sebbene, come si può vedere dalle tabelle riportate sopra, sia possibile arrivare a tagliare anche spessori di 25mm (130A, N_2-N_2). Come gas di protezione vengono comunemente utilizzati o l'azoto o l'aria, la finitura è buona in entrambi i casi. Esiste la possibilità di utilizzare come gas di protezione la CO_2, la quale offre una migliore qualità della superficie finale rispetto ai precedenti, una maggior velocità di taglio e una migliore durata dei consumabili. Il problema della CO_2 è legata al suo costo.

- **Aria**
  È il gas più economico a diposizione e si presta al taglio di acciai al carbonio, acciai inox e alluminio. Naturalmente prima di poter essere utilizzata deve essere filtrata in modo da rimuovere ogni residuo di particolato, d'olio e vapore (solitamente si utilizzano 3 filtri con potere di filtraggio via via maggiore per terminare con un filtro ai carboni attivi). Essa potrebbe comportare una leggera ossidazione o nitrurazione della superficie lavorata che potrebbe causare problemi per lavorazioni successive.
  Essa è associata quasi ed esclusivamente all'aria come gas di protezione.
  Solitamente l'unico materiale che viene tagliato con l'aria come gas è l'alluminio (come è possibile vedere nelle tabelle sopra) ma la superficie di taglio è di mediocre qualità e si presenta con una superficie "dentellata". Sebbene essa costi poco di base causa una scarsa durata dei consumabili, stentando ad arrivare a 800 inneschi, comportando, così, un aumento dei costi di manutenzione della macchina.

- **H35**
  L' H35 è una miscela che prende commercialmente il nome di *argomix*. Essa è composta per il 65% di argon e per il 35% da idrogeno ed è incolore e inodore.
  Questa miscela viene utilizzata quando è necessaria un'elevata temperatura di combustione, poiché essa tra tutti i gas di plasma è quella che fornisce una temperatura del fascio di plasma più elevata.
  Nel taglio dell'acciaio inox crea una superficie di taglio lucida, quindi con un'ottima qualità superficiale, ma all'aumentare dello spessore è possibile che il bordo inferiore risulti "dentellato". Solitamente il gas di protezione utilizzato in combinazione con questa miscela è l'azoto N_2. I suoi limiti sono dovuti all'elevata reattività (infatti bisogna avere un sistema attrezzato per il suo utilizzo) e l'elevato costo.

Si riporta di seguito uno schema riassuntivo sulle combinazioni dei vari gas nel taglio di acciaio al carbonio, acciaio inox, e alluminio.[1]

[1] La tabella fornita dll'Hyperterm è in unità imperiali. Si ricorda che 1 pollice = 25,4 mm

Gas plasma/di protezione	Acciaio al carbonio	Acciaio inox	Alluminio
Aria/Aria	Buona velocità/qualità di taglio Economico	Buona velocità/qualità di taglio economico	Buona velocità/qualità di taglio economico
Ossigeno (O_2)/Aria	Velocità/qualità di taglio eccellente. Pochissima bava	Sconsigliato	Sconsigliato
Azoto (N_2)/CO_2	Qualità di taglio accettabile, un po' di bava. Durata dei consumabili eccellente	Ottima qualità di taglio Durata dei consumabili eccellente	Qualità di taglio eccellente. Durata dei consumabili eccellente
Azoto (N_2)$_2$/Aria	Qualità di taglio accettabile, un po' di bava. Durata dei consumabili eccellente	Ottima qualità di taglio Durata dei consumabili eccellente	Ottima qualità di taglio Durata dei consumabili eccellente
Azoto (N_2)/H_20	Qualità di taglio accettabile, un po' di bava. Durata dei consumabili eccellente	Qualità di taglio eccellente. Durata dei consumabili eccellente	Qualità di taglio eccellente. Durata dei consumabili eccellente
Argon Idrogeno/N_2	Sconsigliato	Eccellente su spessore > 1/2 poll.	Eccellente su spessore > 1/2 poll.

Figure 4.9: Schema riassuntivo sulla scelta del gas di plasma (Hyperterm)[16]

4.4 Altri parametri per ottimizzare il taglio al plasma

4.4.1 Durata dei consumabili

La durata dei consumabili è, sul campo, probabilmente l'aspetto più controllato, poiché da essi è possibile capire immediatamente se i parametri utilizzati nel taglio sono o meno idonei, senza tralasciare che essi hanno un peso rilevante nel computo economico della lavorazione. L'azienda Hyperterm ha brevettato il sistema ®LongLife il quale "aumenta gradualmente" i flussi di gas e corrente ad inizio lavorazione e li diminuisce in modo graduale prima della fine del taglio in modo da ridurre al minimo l'erosione. Quest'ultima fase è inoltre modificabile tramite CAM agendo sul parametro di spegnimento anticipato della fiamma, in modo da accentuare la rampa di discesa e fare in modo che essa cominci all'interno della lamiera per

terminare nel momento esatto di fuoriuscita della torcia in aria.
Al fine di preservare la durata dei consumabili è necessario prestare particolare attenzione ad alcuni aspetti:

- Evitare che la torcia si accenda o rimanga accesa in aria;
- Ogni taglio deve terminare con l'arco incollato alla lamiera (vedi sopra il metodo dello spegnimento anticipato) in modo da evitare le "sfiammate";
- Prestare particolare attenzione nelle ripartenze dopo un'interruzione della lavorazione che l'innesco avvenga all'interno della lamiera e non in una zona precedentemente tagliata.

Solitamente i consumabili che vengono sostituiti quando la qualità del taglio peggiora sono: elettrodo, ugello e shield.
Il componente che determina la sostituzione è principalmente l'elettrodo, il quale deve essere sostituito quando la profondità del cratere è pari o superiore ad 1mm.
Il degrado degli altri consumabili e la loro sostituzione è determinata da:

- Cappuccio di protezione ⟶ erosione, crepe, superficie bruciata
- Schermo ⟶ Presenza di materiale fuso, foro ovalizzato, o-ring danneggiati
- Cappuccio di tenuta dell'ugello ⟶ Fori ostruiti, danni all'o-ring isolante
- Ugello ⟶ Fori dei gas ostruiti, foro centrale ovalizzato, o-ring danneggiati
- Anello diffusore ⟶ schegge, fori dei gas ostruiti, o-ring danneggiati

4.4.2 Angoli di taglio

Il taglio al plasma crea un taglio caratterizzato da due grandezze: la lunghezza di taglio (*Kerf width*), e l'angolo del bordo (*Bevel angle*). In figura 4.10 è possibile osservare questi due parametri.

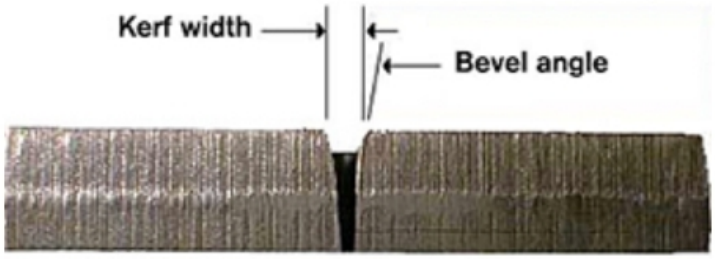


Figure 4.10: Kerf width e bevel angle

La lunghezza del taglio è variabile poiché la colonna di plasma non è costante, ma varia al

variare di: intensità di corrente, flusso del gas di plasma e protezione, tensione d'arco, velocità di movimento della torcia.
Il parametro più influente sulla larghezza del taglio è il diametro dell'ugello, poiché più esso è piccolo più la densità di energia sarà localizzata in un punto con un basso *kerf width*, ma la potenza utilizzabile sarà limitata, altrimenti si potrebbe incorrere nel fenomeno del doppio arco. Volendo aumentare la potenza sarà necessario aumentare anche il diametro dell'ugello in modo da stabilizzare l'arco, avendo come risultato l'aumento della larghezza del taglio.
Esiste una tabella fornita dai produttori di generatori di plasma che calcola esattamente quale sia il valore di compensazione da attribuire alla torcia durante il taglio per far fronte a tale fenomeno.[**?**] (Esse variano in funzione della potenza, dello spessore da lavorare, del materiale e e dei gas utilizzati, come possibile vedere in figura 4.11)

Metrico

Processo	Spessore (mm)											
	1,5	3	5	6	8	10	12	15	20	25	32	38
Acciaio al carbonio												
130 A O_2 / Aria	N/D	1,64	1,77	1,81	1,92	2,04	2,11	2,22	2,65	3,43	4,26	4,59
80 A O_2 / Aria	N/D	1,37	1,53	1,73	1,79	1,91	2,00	2,11	2,72	N/D	N/D	N/D
50 A O_2 / O_2	1,52	1,74	1,86	1,86	2,09	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
30 A O_2 / O_2	1,35	1,45	1,54	1,56	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Acciaio inox												
130 A H35 / N_2	N/D	N/D	N/D	N/D	2,69	2,72	2,77	3,03	2,90	3,25	N/D	N/D
130 A N_2 / N_2	N/D	N/D	N/D	1,83	1,89	1,88	2,42	2,51	3,00	N/D	N/D	N/D
80 A F5 / N_2	N/D	N/D	1,02	1,20	1,05	0,96	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
45 A F5 / N_2	0,59	0,38	0,52	0,54	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
45 A N_2 / N_2	0,49	0,23	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Alluminio												
130 A H35 / N_2	N/D	N/D	N/D	N/D	2,70	2,72	2,77	2,36	2,90	1,72	N/D	N/D
130 A Aria / Aria	N/D	N/D	N/D	2,09	2,09	2,10	2,19	1,91	1,87	2,23	N/D	N/D
45 A Aria / Aria	1,07	1,10	1,25	1,25	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D

Figure 4.11: Tabella per la compensazione della colonna di plasma

L'angolo del bordo è l'angolo formato tra il piano tangente al bordo di taglio e il piano perpendicolare al terreno. Un taglio con *bevel angle* pari a 0° è un taglio perfettamente rettilineo e perpendicolare al piano del materiale.
Il flusso di gas di plasma ha teoricamente la forma di una fiamma e dunque comporterebbe l'impossibilità di ottenere una superficie perfettamente perpendicolare, ma grazie al flusso di gas fatto ruotare in senso orario dallo swirl ring, il lato destro della fiamma diventa pressochè rettilineo, generando un angolo di inclinazione di 1-3° e di 3-8° dal lato opposto (i valori sono migliorabili per sistemi ad alta definizione).
Sebbene la tecnologia stia migliorando notevolmente da questo punto di vista, in alcuni casi

la colonna di plasma non è perfettamente rettilinea, come si può vedere in figura 4.12, e si possono presentare i seguenti casi:

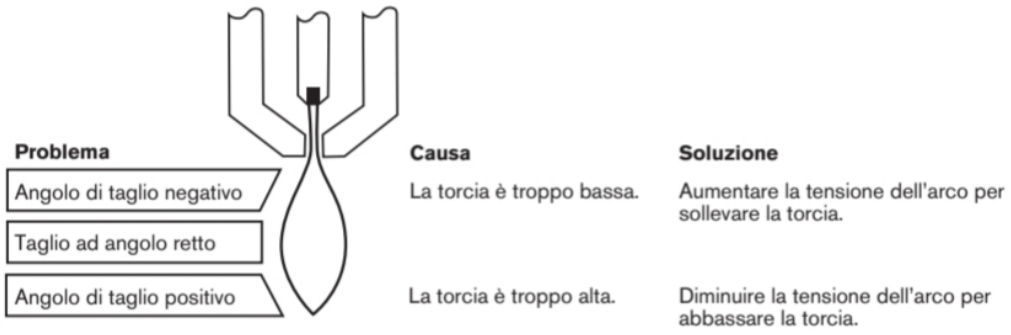


Figure 4.12: Schema della dipendenza dell'angolo di bordo dalla forma della colonna di plasma (Hyperterm)

- **Inclinazione negativa**

  Essa indica che la parte inferiore del pezzo è più piccola rispetto a quella superiore, *sottotaglio*. Questo problema può essere causato da un'eccessiva tensione d'arco, da un'intensità di corrente troppo elevata, o da una velocità troppo bassa.

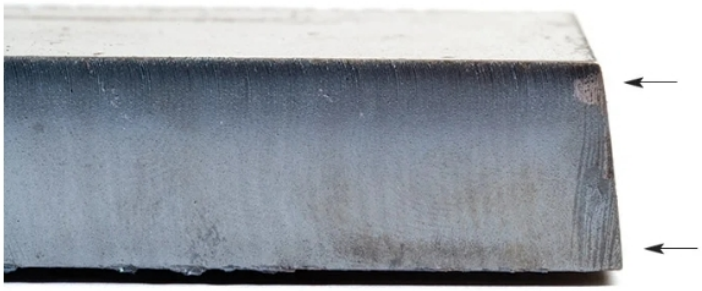


Figure 4.13: Esempio di inclinazione negativa (Hyperterm)

- **Inclinazione positiva**

  Questo tipo di imperfezione si crea quando il processo di taglio non avviene completamente, e ciò potrebbe essere dovuto a fattori come: utilizzo di un ugello consumato, che causa una bassa focalizzazione della colonna di plasma riducendo la capacità di penetrazione, o un'eccessiva velocità di taglio (tendente verso la V_max), o un'eccessiva

tensione d'arco, la quale implica un'elevata distanza tra pezzo e torcia.
Tutti questi fenomeni causano una scarsa penetrazione dovuta ad una densità di energia concentrata maggiormente nella parte superiore del pezzo.

Figure 4.14: Esempio di inclinazione positiva (Hyperterm)

- **Inclinazione irregolare**

  Essa è la situazione più particolare e meno frequente. Essa è caratterizzata da inclinazioni non costanti lungo la superficie di taglio ed è strettamente legata ad un errato settaggio della torcia o ad un disallineamento tra elettrodo e ugello.

Figure 4.15: Esempio di inclinazione irregolare (Hyperterm)

5 Valutazione economica di un sistema per il taglio al plasma

Il macchinario per il taglio al plasma utilizzato durante il tirocinio e descritto nel 3° capitolo di questo elaborato è stato acquistato dall'azienda Vallée Trafor s.r.l., azienda produttrice di trasformatori di medio-bassa tensione in aria.
Il trasformatore è una macchina elettrica statica che sfrutta il principio di induzione magnetica per convertire la tensione in ingresso (primaria) in un'altra tensione in uscita (secondaria). Tale macchina è costituita di un nucleo ferromagnetico, sul quale vengono avvolti due avvolgimenti (avvolgimento primario e avvolgimento secondario) che possono essere sotto forma di lastre (AL o CU), piattine (AL o CU), o fili (AL o CU). Il nucleo ferromagnetico è composto dalla sovrapposizione di sottili lamierini (spessore di circa 0,5mm) per ottenere spessori che vanno da pochi millimetri a diversi centimetri. Questi sono tenuti insieme da piastre di acciaio dolce (utilizzato per motivi di costo) forate, definite *pressate*. Per ogni trasformatore sono necessarie dalle 4 alle 8 pressate per comprimere l'intero nucleo in fase di montaggio.
Il sistema di taglio al plasma è stato acquistato per far fronte ad un collo di bottiglia creatosi nel reparto di costruzione delle piastre di pressata. L'obiettivo aziendale era quello di aumentare la capacità produttiva del reparto mantenendo il numero di risorse (personale) costante, in modo da sciogliere il collo di bottiglia in periodi di particolare carico e non dover operare una redistribuzione del personale in periodo di lavoro scarso.
Il metodo "tradizionale" con cui venivano prodotte tramite il taglio alla lunghezza desiderata di *barre* di circa 3-4m, seguita dalla foratura delle piastre ottenute tramite una "punzonatrice" oleodinamica. Il processo di foratura era particolarmente laborioso poiché per ogni foro era necessario modificare i parametri sul piano millimetrato spostando i riscontri nella posizione desiderata. Inoltre, nel caso di diversi diametri di foratura era necessario procedere allo smontaggio e alla sostituzione del punzone. Appare da subito evidente che i tempi morti causati dalla macchina stessa sono notevoli. Un ulteriore problema nasceva dall'usura dei riscontri dovuta al loro utilizzo continuativo che comportavano uno scostamento superiore ai

5 millimetri sia in verticale che in orizzontale rispetto alle quote di progetto.
È apparso, dunque, necessario provvedere all'acquisto di un macchinario che potesse far sì che si riducessero sia i tempi morti di settaggio della macchina, sia l'aumento di precisione della lavorazione effettuata, e con queste premesse si è deciso di acquistare un macchinario per taglio al plasma.
Tale analisi è stata condotta per verificare la convenienza o meno del nuovo sistema nei confronti del vecchio, poiché sebbene quest'ultimo avesse notevoli limiti, il nuovo introduce una serie di nuovi parametri sia in termini di gestione che di costi.
Infatti, basti pensare al fatto che il nuovo sistema per il suo funzionamento necessita di elevate quantità di energia elettrica (se paragonata ad una piccola pressa oleodinamica), dell'utilizzo di gas (come ossigeno, azoto e aria filtrata), dell'utilizzo di lamiere, le quali hanno un costo maggiore rispetto alle barre, e di una figura specializzata che sia in grado di programmarla tramite software CAM (l'utilizzo del macchinario in modalità manuale è praticamente inutile).
I dati relativi alle tempistiche delle varie lavorazioni sono dati semplificati ottenuti da varie misurazioni sul campo, mentre per quanto riguarda i costi sono valori molto vicini a quelli reali ma non esatti. Inoltre, le simulazioni sui tempi di taglio sono state effettuate su lamiere di dimensioni standard 3000 x 1500mm, sebbene le dimensioni delle lamiere all'interno della produzione siano variabili, poiché essendo le piastre di pressata un componente accessorio del trasformatore e non il prodotto finale si cerca di acquistare le misure di lamiere con quotazione minore (trascurando, anche, la composizione chimica esatta). L'analisi dei costi è stata condotta tralasciando i costi di installazione e i costi di ammortamento, poiché queste informazioni non erano disponibili.

5.1 Analisi dei tempi

Per effettuare l'analisi del tempo di produzione si è deciso di differenziare i tempi di lavorazione in due categorie:

1. Tempi "fissi": Tutti i tempi che sono indipendenti dal numero o dal tipo di pezzi lavorati e rimangono fissi per qualunque lavorazione.

2. Tempi "variabili": Tutti i tempi che sono strettamente legati alla particolare lavorazione e al numero di pezzi[1].

[1] Rientrano in questa categoria le fasi misurabili in $\frac{min}{pz}$

Questa differenziazione è stata effettuata per mettere in luce la differenza dei tempi di assetto, e i tempi "pezzo-indipendenti" dei due sistemi, poiché essi risultano particolarmente incisivi per il sistema di taglio al plasma.

1. **Tempi fissi**

   Per quanto concerne la produzione con il macchinario al plasma i tempi fissi (o pressocché tali) sono:

   - Disegno e programmazione della macchina[2]
   - Carico della lamiera in macchina
   - Azzeramento della macchina
   - Scarico della lamiera

   La lavorazione tradizionale non avrebbe fasi indipendenti dal tipo o dal numero di pezzi, ma è possibile considerare come tempi fissi:

   - Azzeramento della macchina
   - Primo settaggio della macchina[3]

   I tempi fissi rilevati per il taglio al plasma sono:

Azione	Tempo (min)
Disegno e programmazione	10
Carico lamiera	10
Azzeramento macchina	3
Scarico lamiera	15

   I tempi fissi per la lavorazione tradizionale sono:

Azione	Tempo (min)
Azzeramento macchina	2
Settaggio macchina	5

   Appare da subito evidente che osservando solo i tempi fissi delle due lavorazioni il metodo "tradizionale" sia quello più vantaggioso, visto che:

$$T_{plasmaFix} = 38min$$

[2] Teoricamente essi dovrebbero essere tempi variabili, poiché variano in funzione della complessità dei componenti trattati, ma nel caso in questione (piastre di pressata) tale parametro è considerato fisso sulla base dei tempi rilevati

[3] Esso è composto da inserimento primo punzone e regolazione riscontro per il primo foro

rispetto ai:

$$T_{tradFix} = 7min$$

Come è stato accennato sopra, il suo limite è dovuto proprio ai tempi variabili, dovuti ai settaggi della macchina durante la lavorazione, come si vedrà nel seguito.

2. **Tempi variabili**

I tempi variabili per il sistema di taglio al plasma sono esclusivamente dati dalla:

- Fase di taglio[4]

I tempi varibili per la lavorazione tradizionale sono:

- Tempo di taglio piastre;
- Modifica posizione dei riscontri;
- Sostituzione punzone.

I valori numerici in questo caso sono stati valutati per 3 diversi tipi di piastre di pressata[5]:

(a) Piastra con 3 fori con diametro Ø11mm

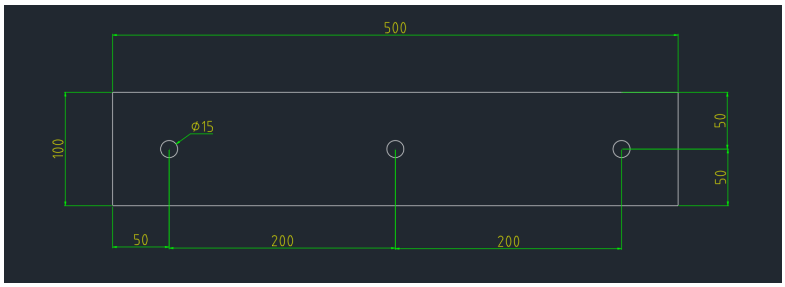


Figure 5.1: Immagine piastra con 3 fori

(b) Piastra con 3 fori con diametro Ø11mm e 2 fori con diametro Ø25

[4] Essa è dipendente dalla forma del pezzo e dal numero di pezzi
[5] Sono state prese in considerazione le tipologie più utilizzate

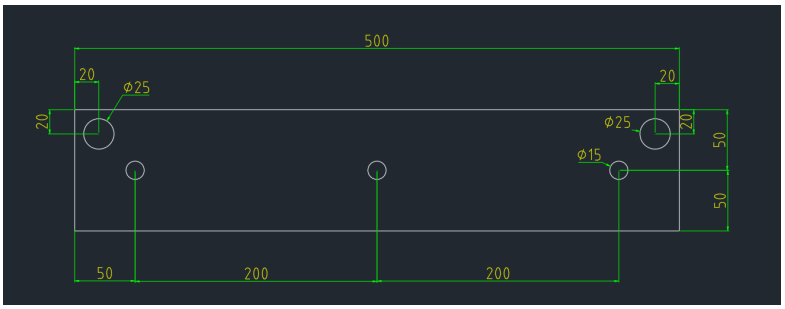


Figure 5.2: Immagine piastra con 3 fori + 2 fori

(c) Piastra con 5 fori con diametro Ø11mm

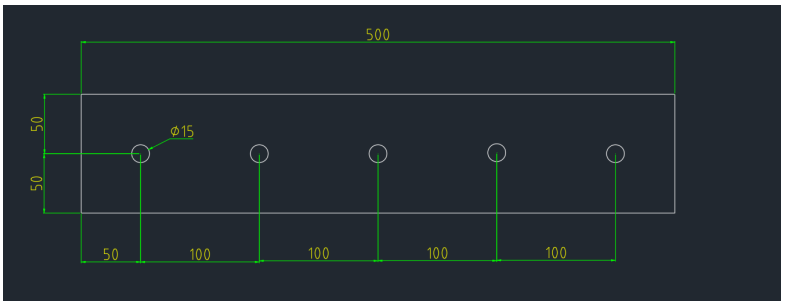


Figure 5.3: Immagine della piastra con 5 fori

(d) Piastra con 5 fori con diametro Ø11mm e 2 fori con diametro Ø25

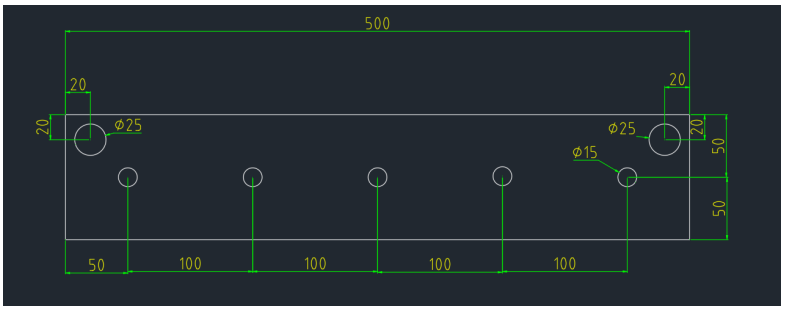


Figure 5.4: Immagine piastra 5 fori + 2 fori

Nel caso di taglio al plasma per completezza si è deciso di considerare sia il caso di taglio a 130A e sia quello a 80A. La principale differenza tra i due tagli consiste nella velocità di taglio, maggiore per il 130A, però il taglio all' 80A presenta una finitura superficiale migliore.
Inoltre, si sono considerati i casi per due diversi spessori: 4 e 8mm. Questo per valutare l'influenza dello spessore nel tempo di taglio.
I valori raccolti per il taglio a 80A su uno spessore di 8mm sono:

Tipologia di pezzo	Corrente [A]	Spessore [mm]	Tempo [s]
Pressata con 3 fori	80	8	60
Pressata con 5 fori	80	8	70
Pressata con 3 fori Ø11 + 2 fori Ø25	80	8	80
Pressata con 5 fori Ø11 + 2 fori Ø25	80	8	90

mentre per il taglio a 130 A su uno spessore di 8mm sono:

Tipologia di pezzo	Corrente [A]	Spessore [mm]	Tempo [s]
Pressata con 3 fori	130	8	35
Pressata con 5 fori	130	8	40
Pressata con 3 fori Ø11 + 2 fori Ø25	130	8	45
Pressata con 5 fori Ø11 + 2 fori Ø25	130	8	50

Mentre i valori raccolti per il taglio a 80A su uno spessore di 4mm sono:

Tipologia di pezzo	Corrente [A]	Spessore [mm]	Tempo [s]
Pressata con 3 fori	80	4	30
Pressata con 5 fori	80	4	35
Pressata con 3 fori Ø11 + 2 fori Ø25	80	4	37
Pressata con 5 fori Ø11 + 2 fori Ø25	80	4	40

mentre per il taglio a 130 A su uno spessore di 4mm sono:

Tipologia di pezzo	Corrente [A]	Spessore [mm]	Tempo [s]
Pressata con 3 fori	130	4	25
Pressata con 5 fori	130	4	30
Pressata con 3 fori Ø11 + 2 fori Ø25	130	4	32
Pressata con 5 fori Ø11 + 2 fori Ø25	130	4	35

Nel caso di tecnologia "tradizionale" non esiste una differenziazione legata allo spessore, poiché la differenza di tempo di foratura per una piastra con spessore 4mm rispetto ad una da 8mm è infinitesima rispetto alle altre grandezze e quindi la si reputa trascurabile.

I tempi rilevati misurati in [min/pz] per il metodo "tradizionale" sono:

Tipologia di pezzo	Taglio	Foratura	Tempo setting
Pressata 3 fori	1	1	0
Pressata 5 fori	1	2	0
Pressata con 3 fori Ø11+2 fori Ø25	1	1	2
Pressata con 5 fori Ø11+2 fori Ø25	1	2	2

Per questo tipo di lavorazione i tempi totali di produzione di un pezzo per le varie tipologie sono:

Tipologia di pezzo	Tempo Totale [min/pz]
Pressata 3 fori	2
Pressata 5 fori	3
Pressata con 3 fori Ø11+2 fori Ø25	4
Pressata con 5 fori Ø11+2 fori Ø25	5

Nel confrontare i tempi di produzione tramite le due tecnologie si è deciso di considerare i seguenti parametri:

- Il caso di piastra 3 fori (caso più semplice) utilizzando per il plasma il caso con parametri di taglio che offrono una maggiore velocità (130A ,4mm) e quelli più lenti (80A, 8mm), confrontandoli con i tempi del metodo tradizionale;
- Il caso di piastra con 5 fori + 2 (caso più complesso) utilizzando per il plasma il caso con i parametri di taglio che offrono una maggiore velocità (130A ,4mm) e quelli più lenti (80A, 8mm), confrontandoli con i tempi del metodo tradizionale.

Come si può vedere in figura 5.5 la tecnologia di taglio al plasma non è in assoluto la tecnologia più veloce, anzi, osservando attentamente si vede dal confronto tra l'utilizzo di un taglio a 130A su piastra da 4mm di spessore e il metodo tradizionale, che per lavorazioni sotto i 20 pezzi non conviene in termini di tempo utilizzare il taglio al plasma, poiché essa richiede un tempo fisso di preparazione notevole (dovuto alla fase di programmazione, carico, azzeramento e scarico). Per quanto riguarda il caso di parametri del plasma a 80A e 8mm la situazione cambia leggermente poiché i pezzi da produrre per essere più vantaggiosa rispetto alla tecnologia tradizionale diventa di 33 pezzi.
All'aumentare dei pezzi è evidente che il gap tra il metodo tradizionale e il taglio al plasma diventa notevole e su una produzione di 75 pezzi[6] i tempi della tecnologia più rapida del taglio

[6] Si è considerato tale valore, per semplicità di trattazione, poiché sono i pezzi innestabili all'interno di una sola lamiera

al plasma richiede meno della metà del tempo rispetto a quella tradizionale.
In figura 5.6 è possibile osservare come le considerazioni fatte sopra siano sempre valide e, anzi, all'aumentare della complessità del pezzo il margine che il metodo tradizionale aveva nei confronti del plasma nella prima fase della produzione si assottiglia e il punto di pareggio (nel caso migliore per il plasma, 130A 4mm) si riduce da 20 a 8 pezzi e anche nel caso peggiore per il plasma break even point scende sotto i 10 pezzi.
Questa analisi, dunque, mostra come per pezzi semplici occorra prestare particolare attenzione al metodo di produzione, poiché non sempre il taglio al plasma si rivela la soluzione migliore in termini di tempo per piccoli lotti di pezzi semplici. Mentre è evidente come all'aumentare della complessità dei pezzi il sistema di taglio al plasma diventi sempre più vantaggioso e dunque considerabile anche per piccoli lotti di pezzi.

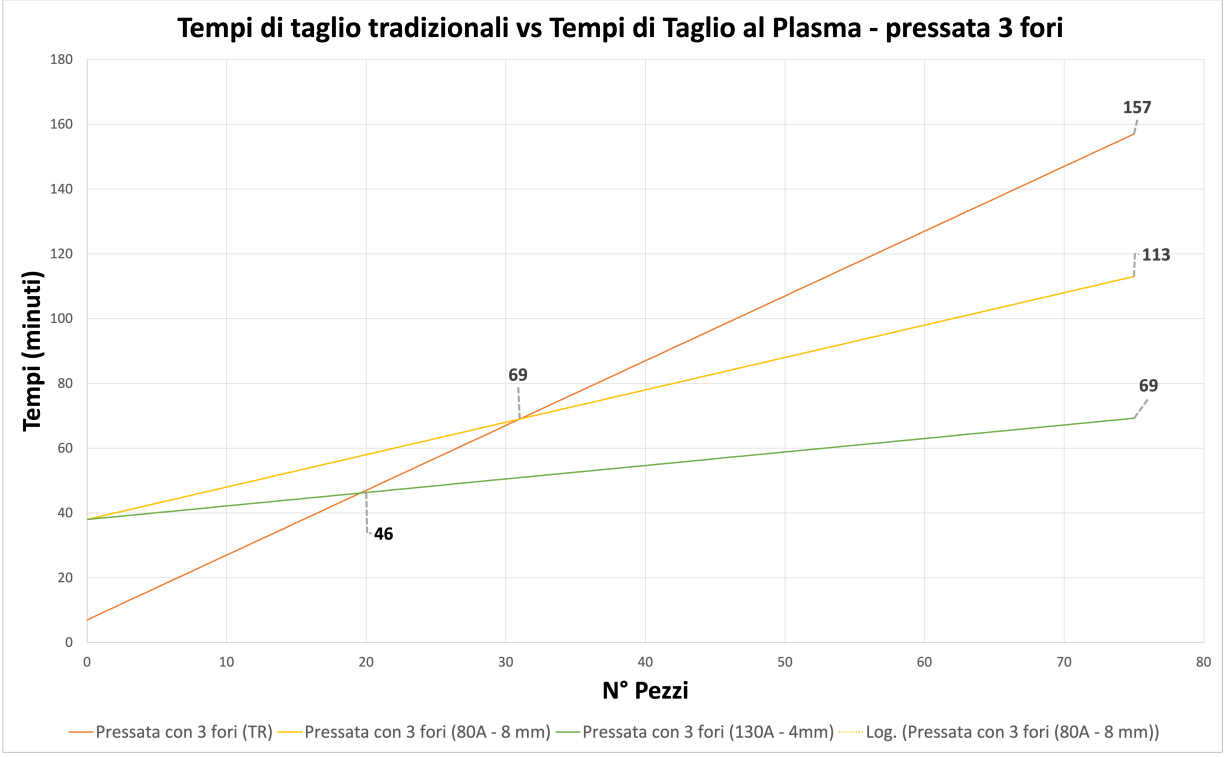


Figure 5.5: Confronto tra i tempi di produzione di una piastra con 3 fori con il taglio al plasma e il metodo tradizionale

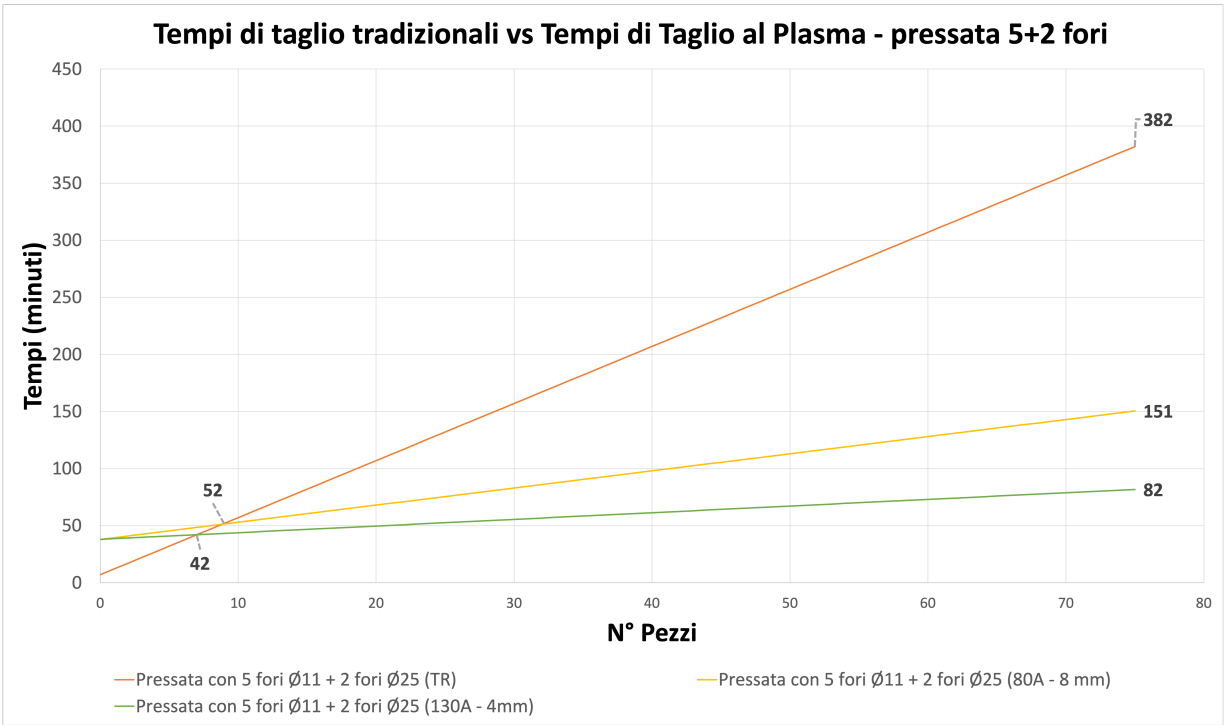


Figure 5.6: Confronto tra i tempi di produzione di una piastra con 5 fori da 11mm e 2 da 25mm con il taglio al plasma e il metodo tradizionale

5.2 Analisi dei costi

Dal punto di vista aziendale l'analisi più importante per valutare l'introduzione di un nuovo macchinario è quella riguardante l'impatto economico che avrà sulla produzione.
Si deve sempre valutare e scegliere la soluzione che comporta il maggior vantaggio in termini di produzione con il minor costo possibile. Nel caso trattato le valutazioni sono state condotte confrontando due tipi di tecnologie differenti: la prima relativa all'acquisto di un sistema per il taglio laser fibra o CO_2, la seconda relativa all'acquisto di un macchinario per il taglio al plasma.
Come visto in precedenza la tecnologia laser offre migliori prestazioni sia in termini di qualità che di velocità, ma ha come controindicazione l'elevato costo sia di acquisto (prezzo circa doppio rispetto alla tecnologia al plasma) sia di gestione e i bassi spessori lavorabili. Al contrario, la tecnologia al plasma offre una qualità di taglio e precisione inferiore ma con un costo di acquisto e gestione notevolmente inferiori.
Non si analizzeranno in questa sede gli argomenti che hanno portato ad una o all'altra scelta, ma basti sapere che, infine, la scelta è ricaduta sul sistema per il taglio al plasma.

Nella valutazione dei costi di lavorazione per un macchinario al plasma si deve tener conto dei seguenti costi:

1. **Costi per l'energia elettrica**

   La parte più energivora di tale tecnologia è data dal generatore di plasma (generatore CC), ed è l'energia necessaria a generare il fascio di plasma con energia sufficiente alla fusione e penetrazione del materiale lavorato. Per stimare il costo energetico della macchina si può ricorrere alla seguente espressione:

   Costo energia = Consumo di energia x Tempo di utilizzo x €/kWh

   Per stimare un valore consono di consumo energetico, occorre moltiplicare la potenza del generatore per un coefficiente che tenga conto dell'efficienza di alimentazione solitamente approssimabile all' 85%.
   Nel caso di un sistema a 130A con tensione media di funzionamento di 140V, la potenza del generatore è di 18,5 kVA, quindi tenendo conto del coefficiente sopra la potenza assorbita sarà di 15,5 kW.
   Per ottenere il consumo giornaliero sarà sufficiente moltiplicare per il tempo di funzionamento giornaliero.
   Bisognerebbe, per completezza, considerare anche i consumi relativi al funzionamento del CNC e quelli per la produzione dell'aria (compressore ed essiccatore), ma essi si ritengono trascurabili.

2. **Consumo di gas**

   Il consumo di gas è un altro fattore particolarmente importante nel bilancio del costo di funzionamento della macchina, poiché essa per poter operare necessita di diversi gas (ossigeno, azoto, argon-idrogeno, aria, etc.), i quali possiedono prezzi molto diversi l'uno dall'altro.
   Il calcolo del costo per il gas può essere ottenuto come:

   Costo gas = Consumo x Tempo di accensione x €/l

   È possibile osservare come i tassi di consumo siano forniti dalla casa costruttrice e presenti nelle tabelle riportate nel capitolo 4 (espressi in [l/min]). Per ottenere il valore del consumo di gas sarà sufficiente moltiplicare il tasso di consumo per il tempo di accensione della fiamma.
   Discorso a parte va fatto per l'utilizzo dell'aria, la quale è prodotta quasi senza costo, tralasciando quelli legati al consumo di energia e per la depurazione.

3. **Sostituzione dei consumabili**

   Esso è il parametro più complicato da determinare poiché; come visto precedentemente, la loro usura è dipendente da molti fattori.
   Esistono 2 modi per stimare il loro costo: il primo è quello di monitorare la spesa per il loro acquisto, monitorando le sostituzioni effettuate e dividendo per il tempo interessato, il secondo è quello di ipotizzare che, essendo usati in condizioni di progetto, la loro usura sia dipendente esclusivamente dal numero di inneschi e dal tempo di accensione.
   Il primo metodo risulta particolarmente approssimativo e necessità di uno studio sul lungo periodo, al contrario il secondo risulta essere più semplice, offrendo valori molto vicini alla realtà.

   Per calcolare il costo dei consumabili si ricorre dunque alla formula:

   Costo consumabili = Tasso di consumo x Tempo di accensione x Costo dei componenti

   Per semplicità per questo costo si ricorre ad una semplificazione. Dal momento che, come visto nel capitolo 2, l'usura principale è quella che interessa l'elettrodo (solo successivamente ugello e shield)ed è creata in particolar modo dalla fase di accensione della torcia, si è soliti valutare il tasso di usura in termini di "numero di inneschi", trascurando, in un certo senso, il tempo di accensione[7].

4. **Manodopera**

   La manodopera è il valore più impattante dal punto di vista economico sulla lavorazione ed è quindi quello su cui si deve prestare particolare attenzione.
   Nell'utilizzo di una macchina al plasma è possibile che vi sia la presenza di un numero variabile di persone a seconda dei casi. Per esempio, basti pensare alla situazione in cui l'operatore che si occupa del taglio non sia correttamente formato e, di conseguenza, ne risulti un taglio di scarsa qualità: ciò comporterebbe la necessità di lavorazioni successive condotte da un altro operatore, e in questo caso avremmo un costo doppio di manodopera.
   Nel caso in cui, invece, l'operatore sia in grado di gestire correttamente i parametri di taglio e ottenere un taglio di ottima qualità, non si necessiterebbe di una figura aggiuntiva per altre lavorazioni.
   Alla luce di queste argomentazioni è possibile calcolare il costo della manodopera come:

[7] In realtà esso non viene trascurato, poiché, essendo i pezzi trattati tutti molto simili in termini di lunghezza e geometria di taglio, questo parametro è automaticamente inglobato all'interno del valore del numero di inneschi, come se nel valore del singolo innesco sia compreso anche il tasso di usura derivante del taglio conseguente ad esso. Tutto ciò non sarebbe vero se le lunghezze trattate fossero notevolmente differenti poiché l'usura su un taglio di 10m comporterebbe un degrado notevolmente maggiore di uno di 50cm

Costo della manodopera = Ore totali x Tariffa oraria x numero di persone

5. **Costo del materiale e dello scarto**

   Per ottenere il costo di un pezzo occorre, inoltre, considerare il costo del materiale utilizzato; inoltre, durante il taglio, occorre tener presente che non tutto il materiale a disposizione viene utilizzato per produrre i pezzi. Tra un pezzo e l'altro rimane sempre del materiale che a fine lavorazione andrà scartato.
   Occorre, quindi, cercare di programmare la macchina in modo che il materiale residuo sia il minore possibile, senza pregiudicare però la qualità dei pezzi tagliati.
   I valori di scarto si aggirano attorno al 7-8% della superficie della lamiera.

Nella seguente tabella si riportano alcuni valori necessari per il calcolo dei parametri di costo sopra analizzati:

Parametro	Costo
Costo energia elettrica	0,45 €/kWh
Costo Bombola di Ossigeno	18 €
Costo consumabili	40 €
Costo manodopera	25 €/h
Costo Acciaio lamiera	2 €/kg

I costi del metodo tradizionale si limitano a:

1. **Costo dell'energia elettrica**

   Con una *punzonatrice* oleodinamica i consumi di energia sono notevolmente inferiori rispetto a quelli del macchinario per il taglio al plasma. I consumi di questo macchinario si attestano attorno agli 2kWh

2. **Costo della manodopera**

   In questo caso la manodopera è il principale costo legato alla produzione dei pezzi, poiché per la produzione di essi l'operatore è costantemente coinvolto.

3. **Costo del materiale e dello scarto**

   Nel caso di questo tipo di lavorazione, al contrario del taglio al plasma, il materiale viene utilizzato senza scarti nella sua totalità. Inoltre, le piastre acquistate hanno un prezzo leggermente inferiore al kg rispetto alle lamiere utilizzate per il taglio al plasma.

Parametro	Costo
Costo energia elettrica	0,45 €/kWh
Costo manodopera	25 €/h
Costo Acciaio	1,5 €/kg

Per valutare la convenienza economica di un metodo rispetto all'altro si sono considerati i seguenti casi studio:

- Caso di produzione di 20 pezzi (caso di lotto piccolo);
- Caso di produzione di 95 pezzi (caso di lotto medio);
- Caso di produzione di 180 pezzi (caso di lotto grande).

In tale analisi, per semplicità si è considerato per il plasma un tempo medio di taglio per pezzo di 40s, mentre per il metodo "tradizionale" si è considerato un tempo medio di produzione di 3 minuti a pezzo, senza considerare azzeramenti della macchina oltre a quello della fase iniziale, nell'ipotesi che i lotti fossero tutti di pezzi uguali. Analizzando il primo caso, quello per il lotto di 20 pezzi, si evince che, come nel caso dei tempi, la tecnologia di taglio al plasma non sia sempre quella conveniente: infatti, i tempi di preparazioni della macchina hanno un costo non indifferente, poiché, nel caso trattato, tali procedure vengono svolte interamente da un operaio. Il punto di pareggio oltre il quale il plasma diventa la scelta migliore è di circa 13 pezzi (per un costo di 50€); al di sotto è sempre preferibile il metodo tradizionale poiché ha costi legati a tempi "morti" inferiori.
Estendendo la trattazione, figura 5.8, per lotti di medie dimensioni (95 pezzi) si può osservare che la convenienza del plasma diventa via via più netta, fino al 90° pezzo, oltre il quale bisogna tener conto del tempo di scarico della lamiera vecchia e di carico di quella nuova, e che dunque tende a far diminuire il gap tra le due curve, sebbene il plasma abbia comunque un margine di convenienza 299€ contro i 349€ del metodo tradizionale.
In figura 5.9, si può osservare il comportamento delle curve per grandi lotti (180 pezzi). Dopo il gradino nato dalla fase di scarico/carico della lamiera le due curve ricominciano a divergere per arrivare al 180° pezzo, dove si deve di nuovo tener conto dello scarico della lamiera.
In ogni caso è possibile osservare come nel caso di numerosi pezzi il risparmio sia notevole, per 180 pezzi prodotti con il taglio al plasma, il costo è di circa 100€ inferiore rispetto al metodo tradizionale (550€ per il plasma contro i 658€ per il metodo tradizionale).
Si può dunque notare come anche dal punto di vista economico ci sia la necessità di prestare particolare attenzione al numero di pezzi da produrre, poiché solo oltre un certo valore la tecnologia al plasma offra vantaggi significativi.
Si mette, comunque, in evidenza come in questo caso studio non siano stati considerati

numerosi costi legati al macchinario al plasma, come ammortamento della macchina, costi di installazione, costi di modifica degli impianti già presenti, costi di formazione, ecc.
La trattazione svolta si pone in condizioni di macchina completamente ammortizzata nel tempo, ovvero pone il macchinario al plasma sullo stesso piano economico di quello "tradizionale", volendo mettere in luce solamente le differenze di costi legati alla produzione dei componenti.

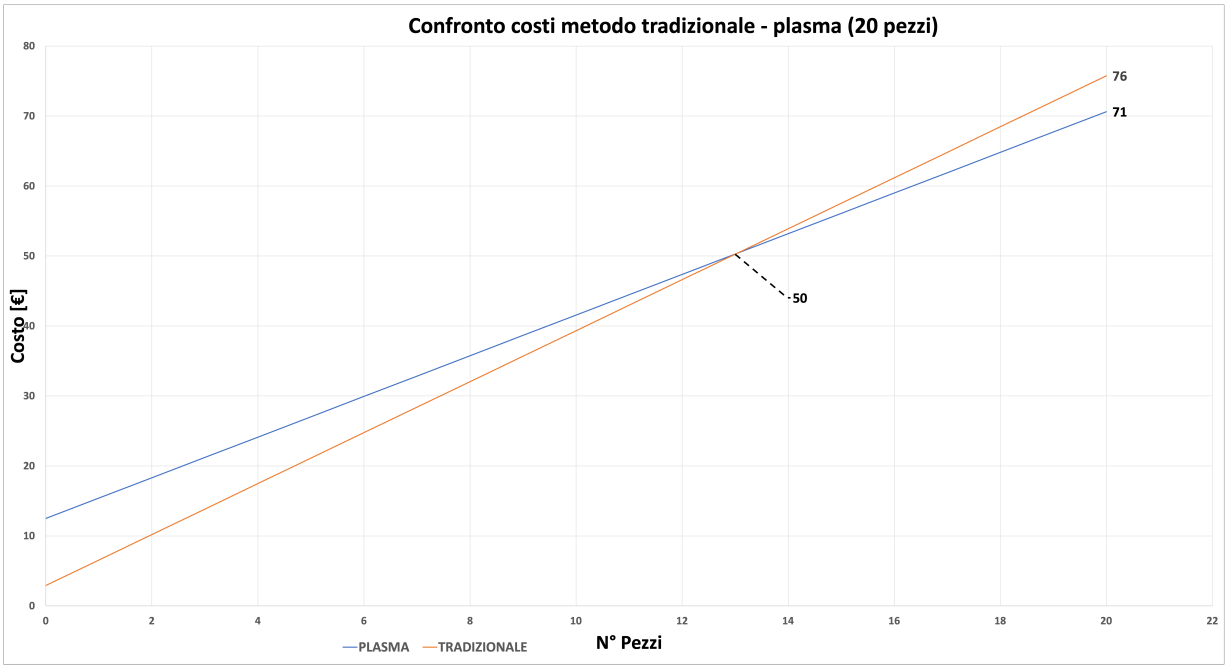


Figure 5.7: Confronto costi di produzione di 20 pezzi tra tecnologia al plasma e metodo tradizionale

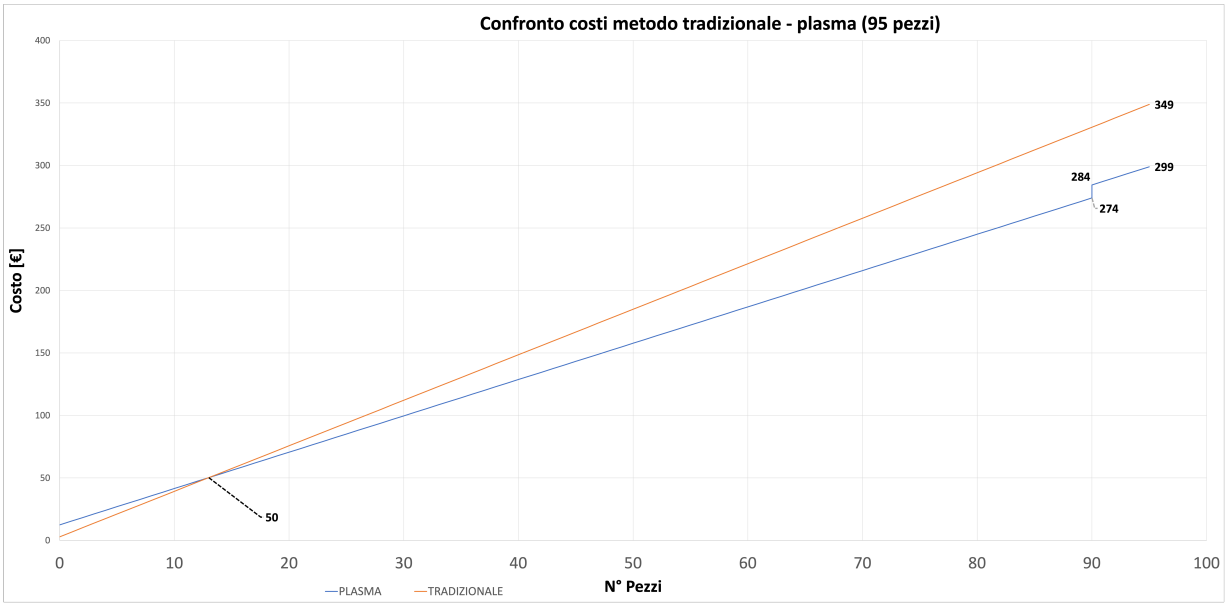


Figure 5.8: Confronto costi di produzione di 95 pezzi tra tecnologia al plasma e metodo tradizionale

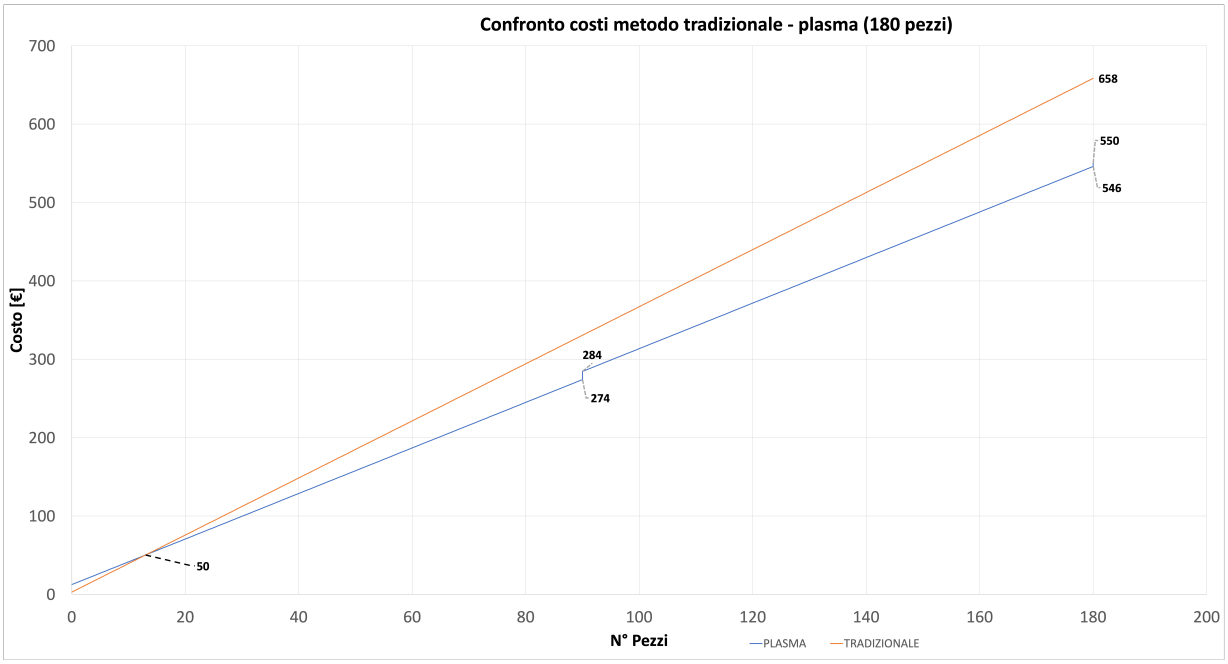


Figure 5.9: Confronto costi di produzione di 180 pezzi tra tecnologia al plasma e metodo tradizionale

6 Conclusione

In questa tesi si è mostrato come l'influenza dei parametri di taglio possano influenzare la qualità del pezzo lavorato sia in positivo che in negativo, cercando, per quanto possibile di offrire una soluzione pratica ai problemi trattati.
Infatti, la prima parte della tesi è stata dedicata interamente alla trattazione teorica, prima dello stato di plasma, poi dei fenomeni fisici che interessavano il taglio al plasma, per poi passare ad una trattazione più pratica legata ai parametri di taglio e alla loro ottimizzazione.
Dunque, all' interno di tale lavoro si è cercato di combinare al meglio gli aspetti più teorici con quelli più pratici osservati sul campo.
In particolare, questa tesi si è concentrata molto più sui parametri fisici del taglio al plasma come pressione e flusso dei gas, velocità di taglio e intensità di corrente, tralasciando in parte gli aspetti legati alla programmazione della macchina CNC come gestione degli attacchi e dei percorsi di taglio, anticipi/ritardi sull'accensione e spegnimento della fiamma, ecc., per problemi di tempo.
Infatti, purtroppo, i dati raccolti sono stati di natura qualitativa, e ciò è stato dovuto sa una parte all'assenza di strumenti con cui condurre osservazioni più approfondite, e dall'altra perché essendo la fase di sperimentazione stata condotta all'interno di un'azienda produttiva, il macchinario doveva produrre per fini aziendali, non lasciando troppo spazio alla parte di pura sperimentazione.
L'analisi effettuata, comunque, ha confermato molti risultati ottenuti da altri studi condotti sull'argomento.
Grazie ad essa, inoltre, si è riusciti ad arrivare ad una buona ottimizzazione della macchina riuscendo a massimizzare i requisiti di velocità con quelli di qualità, con un ottimo rapporto qualità prezzo del pezzo lavorato.
Dati particolarmente interessanti sono stati ottenuti dall'analisi economica della macchina, confrontata con il metodo di produzione precedente (utilizzo di una punzonatrice oleodinamica, definito nel testo come "metodo tradizionale"), analisi che mette in luce come in taluni

casi, l'acquisto di un macchinario CNC non sia così conveniente né sotto l'aspetto di velocità di produzione né dal punto di vista della convenienza economica. Infatti, si è dimostrato che per piccoli lotti di pezzi, in termini di tempi, la soluzione tradizionale è superiore al macchinario di taglio al plasma, a causa dei tempi (notevoli) di preparazione di quest'ultima. Naturalmente, bisogna tener conto del fatto, che l'inversione di tendenza è assai rapida, e non sono necessarie quantità molto elevate di pezzi da produrre per vedere un'effettiva convenienza del metodo di taglio al plasma.
Per quanto riguarda i costi la tendenza è molto simile a quella per i tempi, poiché la fase di preparazione della macchina per il taglio al plasma è particolarmente dispendiosa, dato che oltre a non produrre essa è gestita interamente dalla manodopera, che tra tutti costi è quello che incide maggiormente nell'economia dell'analisi (come investimento futuro, per esempio, si potrebbe valutare l'automatizzazione della fase di preparazione). Di nuovo, però, la velocità di produzione della macchina e i suoi consumi tutto sommato contenuti compensano rapidamente lo svantaggio iniziale, riuscendo per lotti di pezzi non troppo elevati ad ottenere un buon vantaggio economico, che per lotti estremamente numerosi arriva quasi ad essere doppio rispetto al metodo tradizionale.
Per il futuro sarebbe estremamente interessante ampliare l'analisi tenendo conto di molti fattori trascurati in questa tesi per mancanza di informazioni, come per esempio i costi iniziali di acquisto (considerando eventuali agevolazioni fiscali per l'acquisto del macchinario), i costi di ammortamento, i costi di installazione, i costi di formazione del personale, ecc., in modo da avere un quadro nettamente più chiaro della convenienza o meno dell'acquisto e installazione di un tale impianto e di quanto tempo ci voglia, in base al tipo di produzione, tale impianto venga completamente ammortizzato.

Bibliography

[1] ATKINS W., FRIEDMAN S.,
Meccanica quantistica molecolare, Zanichelli (2000)

[2] BOSIA G.,
Lezione 8 Equazioni di stato di un plasma, Fisica del plasma confinato

[3] BOULOS M.I.,FAUCHAIS P., PFENDER E.,
Thermal Plasmas - Vol. 1: Fundamentals and Applications. ,New York : Plenum Press, 1994.

[4] BRADT H.,
Saha Equation. Supplement to Chapter 4 of Astrophysics Processes (AP), (2008)

[5] CANTORO G.,
Simulazione e diagnostica di plasmi termici ad arco trasferito per il taglio di materiali metallici, Tesi di dottorato, 2010.

[6] CHIUDERI C.,
INTRODUZIONE ALLA FISICA DEL PLASMA Appunti dal corso di Fisica del plasma, (2010)

[7] EMSIS,
PLASMA INTERFACE, HMI per macchine da taglio plasma ed ossitaglio

[8] FERRARI A.,
Stelle, galassie e universo: fondamenti di astrofisica,
Springer (2011)

[9] FLEMMER M.,
Plasma-arc Cutting control: Investigations into machine vision, modelling and cutting head kinematics, Tesi di dottorato (2018)

[10] HPM,
Manuale di istruzioni per l'uso e la manutenzione MODELLO STEEL MAX

[11] HYPERTHERM,
Taglio spigolosità, https://www.hypertherm.com/it/support/system-support/maintenance-and-use/cut-quality/cut-angularity/.

[12] HYPERTHERM,
Techiniques for Precision Plasma Cut, www.hypertherm.com

[13] HYPERTHERM,
Linear feedback shift-registers (LFSR) and Pseudo-random binary sequences (PRBS),
California Institute of Technology,Owens Valley Radio Observatory, May 17, 2011.

[14] HYPERTHERM,
Problemi di qualità di taglio – bava, https://www.hypertherm.com/it/support/system-support/maintenance-and-use/cut-quality/too-much-dross/

[15] HYPERTHERM,
Level Shifting Interfaces for Low Voltage Logic,
9th NASA Symposium on VLSI Design 2000.

[16] HYPERTHERM,
Guida illustrata alla scelta del gas plasma, https://www.hypertherm.com/it/learn/articles/guide-to-plasma-gas-selection/

[17] HYPERTHERM,
Costi operativi del taglio al plasma automatizzato, https://www.hypertherm.com/it/learn/articles/operational-costs-of-automated-plasma-cutting/

[18] HYPERTHERM,
HyPerformance Plasma HPR130XD. Manual gas revisione 3, (2015)

[19] INTERNATIONAL STANDARD ISO 9013,
Thermal cutting- Classification of thermal cuts Geometrical product specification and quality tolerances , (2002).

[20] MAZZOLENI F.,
Tecnologie dei metalli volume 3 pag. 197-201 , (1980)

[21] MECCANICA NEWS,
Tutto sul taglio laser, https://www.meccanicanews.com/taglio-laser/

[22] NEMCHINSKY, V. ,
Liquid metal movement during plasma arc cutting, (1994)

[23] NEMCHINSKY, V.,
"The Effect of the type of plasma gas on current constriction at the molten tip of an arc electrode, (1996)

[24] NEMCHINSKY, V.,
Plasma flow in a nozzle during plasma arc cutting, (1998)

[25] NEMCHINSKY, V. ,
Heat transfer in plasma arc cutting, (2017)

[26] NEMCHINSKY, V. ,
Cathode Erosion due to Evaporation in Plasma Arc Cutting Systems , (2013)

[27] NEMCHINSKY, V.,
Temperature Created by a Moving Heat Source That Heats and Melts the Metal Plate (Plasma Arc Cutting), (2016)

[28] NEMCHINSKY, V.,
Dross formation and heat transfer during plasma arc cutting., Journal of Physics D: Applied Physics, 30(18), 2566. (1997)

[29] NEMCHINSKY, V., SEVERANCE, W.,
What we know and what we do not know about plasma arc cutting., Journal of Physics D: Applied Physics, 39(22), R423 (2006)

[30] NEMCHINSKY, V., SEVERANCE, W,
Plasma arc cutting: speed and cut quality, Journal of Physics D: Applied Physics, 42(19), 195204.

[31] OLIVARES STEFANO,
Distribuzione di Maxwell delle velocità., Università degli studi di Milano (2019).

[32] PREVITALI B.,
Taglio plasma HT: modelli analitici e risultati sperimentali., Tesi di dottorato (2002)

[33] PEMPINELLI F.,
Appunti del corso di Fisica dei Sistemi non Lineari Fisica dei Plasmi, (1998)

[34] ROTUNDO F.,
Design and optimization of components and processes for plasma sources in advanced material treatments , Tesi di dottorato (2012)

[35] TEULET, L. GIRARD, M. RAZAFINIMANANA, A. GLEIZES, P. BERTRAND, F. CAMY-PEYRET, E. BAILLOT, F. RICHARD,

Experimental study of an oxygen plasma cutting torch: I.Spectroscopic analysis of the plasma jet,, Journal of Physics D: Applied Physics, 39 (2006)

[36] WIKIPEDIA,
Onda di Alfven, https://it.wikipedia.org/wiki/Onda_di_Alfvén

[37] WIKIPEDIA,
Plasma (fisica), https://it.wikipedia.org/wiki/Plasma_(fisica)

[38] WIKIPEDIA,
Taglio al plasma, https://it.wikipedia.org/wiki/Taglio_al_plasma