



Università degli Studi di Roma "La Sapienza"
Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Meccanica e Aeronautica

Corso di Laurea Triennale in
Ingegneria Meccanica

WATERJET – Lavorazioni a getto d'acqua (WJM/AWJM)



Esame di Tecnologie Speciali (A.A. 2008/09)

Docente:

Prof. Italo Libri

Studente:

Daniele Cortis

Indice

Capitolo 1	La tecnologia Waterjet	4
1.1	Introduzione	4
1.2	Il funzionamento	5
1.3	Parametri di processo	7
1.4	I vantaggi del Waterjet	8
1.5	Gli svantaggi del Waterjet	9
Capitolo 2	Il Principio fisico	10
2.1	Calcolo della velocità di efflusso dall'ugello primario	10
2.2	Calcolo della velocità in uscita dal focalizzatore	13
2.3	Calcolo dell'energia cinetica del getto di sola acqua	15
2.4	Calcolo dell'energia cinetica del getto idroabrasivo	16
Capitolo 3	Le principali applicazioni.....	17
3.1	Taglio	18
3.2	Foratura	20
3.3	Fresatura	21
3.4	Preparazione delle superfici, pulizia e rimozione del rivestimento	22
3.5	Pallinatura	22
3.6	Formatura.....	22
3.7	Taglio con sola acqua	23
Capitolo 4	Analisi di una lavorazione	26
Capitolo 5	Stato dell'arte	29
Bibliografia	32

1. La tecnologia Waterjet

La tecnologia a getto d'acqua, Waterjet, a causa della peculiarità del meccanismo di asportazione del materiale che la caratterizza, rientra in quelle che vengono più comunemente definite **tecnologie non convenzionali**.

1.1 Introduzione

La tecnologia Waterjet consente di tagliare una grande varietà di materiali, metallici e non, utilizzando un getto d'acqua ad elevatissima velocità.

Il getto è ottenuto forzando l'acqua attraverso un ugello realizzato con materiale ad elevata durezza e con un foro di uscita avente un diametro generalmente compreso tra i 0,1mm e 0,6mm. La pressione dell'acqua può variare da circa 200 a 400 MPa e la velocità di uscita varia da 500 a 900 m/s. In queste condizioni il getto d'acqua erode velocemente il materiale comportandosi come una lama (figura 1.1), e può tagliare materiali spessi e sottili fino a 150mm.

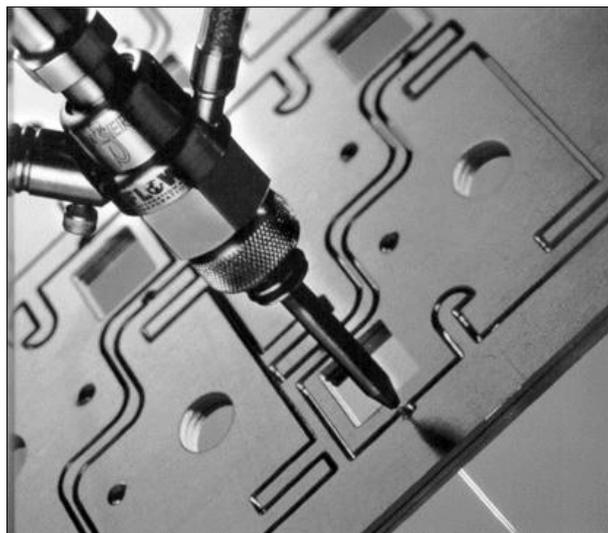


Figura 1.1

Tale getto d'acqua può essere o meno addizionato con una sostanza abrasiva (polveri abrasive naturali o sintetiche): nel primo caso si parla di **Abrasive Water Jet Machine (AWJM)**, nel secondo caso si parla di **Water Jet Machine (WJM)**.

Nei materiali quali plastica, legno, alimentari, non si utilizza l'abrasivo perché basta il semplice getto d'acqua (WJM), mentre per marmi, graniti, acciai, materiali compositi è necessario per il taglio l'aggiunta di abrasivo (AWJM).

Ciò fa sì che tale tecnologia sia interessata da diversi settori industriali che vanno dall'industria alimentare e tessile, all'industria automobilistica ed aeronautica.

1.2 Il funzionamento

Questa tecnologia per eseguire le lavorazioni di taglio sfrutta la quantità di moto posseduta da un fluido di lavoro. Per conferire quantità di moto al fluido si utilizza una pompa alternativa ad alta pressione costituita da un intensificatore di pressione a doppio effetto (figura 1.2).

L'intensificatore è costituito da due sezioni, una di bassa pressione in cui viene pompato olio idraulico che muove un pistone di grosso diametro ed una di alta pressione in cui due pistoni di diametro ridotto collegati al primo realizzano l'incremento di pressione dell'acqua.

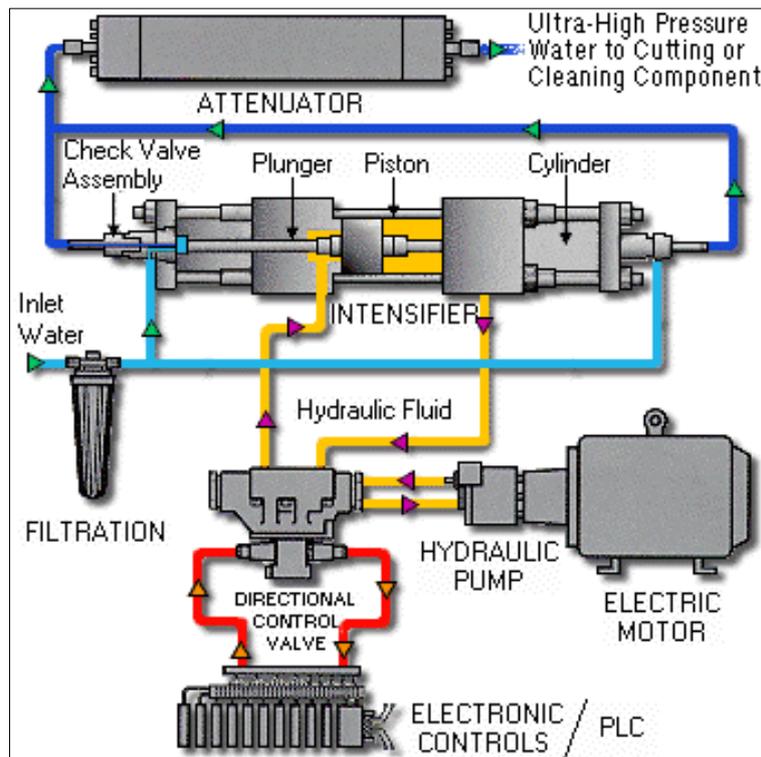


Figura 1.2 .- Schema di funzionamento Waterjet Machine

La differenza di sezione dei pistoni comporta un rapporto di pressione tra acqua ed olio generalmente compreso tra $20 \div 25$ in modo che all'uscita dal cilindro l'acqua raggiunga valori di pressione massima dell'ordine dei 400 MPa.

L'acqua ad alta pressione viene così inviata ad un serbatoio di accumulo che serve per regolarizzare ed uniformare la portata del fluido, poiché nella fase di compressione si generano fluttuazioni della pressione causate dall'interruzione del pompaggio nei punti di inversione del moto dei pistoni, dalle deformazioni delle tubature e dalla comprimibilità del fluido. Per evitare questo problema oggi ci sono sistemi Waterjet che in luogo dell'accumulatore presentano due intensificatori di pressione collegati in parallelo, ma non in fase.

Dal serbatoio mediante condutture d'alta pressione, raccordi statici, giunti rotanti e serpentine l'acqua viene inviata in un ugello calibrato (figura 1.3). Prima di essere espulso ad una velocità pari a circa tre volte quella del suono, il getto d'acqua viene addizionato o meno di abrasivo (WJM/AWJM), a seconda della durezza del materiale da lavorare.

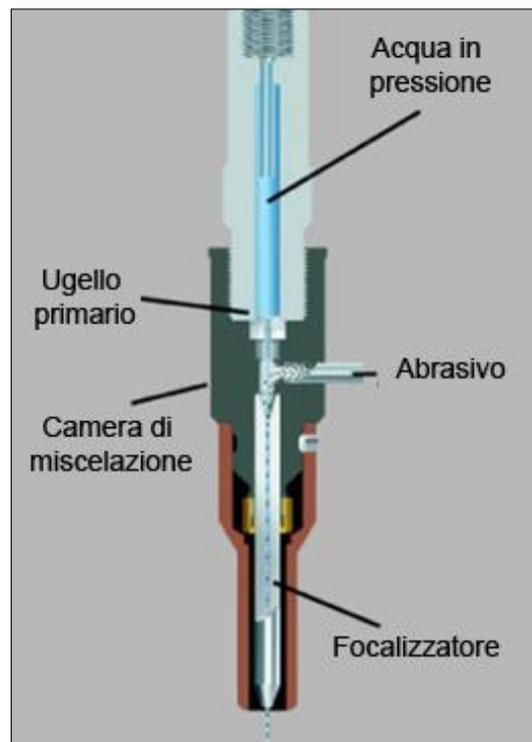


Figura 1.3 - Sezione della testa di taglio

Il risultato è un getto idroabrasivo supersonico che viene diretto contro la superficie del pezzo in lavorazione determinando l'asportazione di materiale tramite un meccanismo di erosione.

Oltre che tagliare anche su materiali non tagliabili altrimenti attraverso altre tecnologie, gli impianti di taglio a getto d'acqua nelle loro esecuzioni più progredite possono sostituire anche la lavorazione ad asportazione di truciolo, almeno in certi casi: infatti le altissime precisioni di taglio oggi raggiunte rendono ciò possibile e spesso conveniente.

Quattro fattori importanti determinano il grado di rugosità:

- Pressione di lavoro
- Altezza dell'ugello
- Velocità di movimentazione della rulliera e dell'ugello

La perfetta combinazione di questi fattori determinano le differenti finiture superficiali e forniscono risultati diversi con materiali differenti.

I macchinari per il taglio Waterjet sono dotati di un sistema a Controllo Numerico che garantisce una gestione automatica delle funzioni operative con alta qualità e precisione, è possibile inoltre un interfacciamento con un sistema CAD-CAM che permette la massima libertà di espressione: si possono eseguire disegni tecnici con tolleranza ristrette e disegni artistici di qualsiasi complessità.

1.3 Parametri di processo

I parametri di processo da cui dipende la qualità del taglio sono molti ed una loro ottimizzazione consente di avere lavorazioni qualitativamente ed economicamente valide.

Di seguito si riportano i principali parametri di processo di questa tecnologia.

- ▶ Pressione dell'acqua: generalmente si applicano pressioni che superano la pressione critica per ogni materiale e comunque tali da ottimizzare la qualità del taglio.
- ▶ Velocità di avanzamento trasversale: è la velocità con cui si sposta la testa di taglio. Da questo parametro dipende la qualità e la economicità della lavorazione.
- ▶ Ugello primario: è costituito da uno zaffiro di diametro inferiore al millimetro. La sua geometria varia per applicazione di taglio a getto d'acqua con abrasivo o non.
- ▶ Ugello secondario o focalizzatore: è un ugello calibratore che si trova dopo la camera di miscelazione tra abrasivo ed acqua. Importanti sono il suo diametro e la sua lunghezza.
- ▶ Distanza di stand-off: è la distanza tra l'ugello di uscita del getto idroabrasivo ed il pezzo. Il getto una volta uscito dal focalizzatore tende a non restare coerente, la divergenza o meglio l'espansione della sezione del getto dipende dalla distanza percorsa dal getto fuori dal focalizzatore, la distanza ugello-pezzo deve essere dell'ordine dei millimetri, se si esagera con la distanza di stand-off, il getto invece di tagliare esercita sul materiale solo un'azione erosiva limitata, utile per la pulizia delle superfici.

In particolare per quanto riguarda l'Abrasive Water Jet Machine (AWJM) abbiamo:

- ▶ Portata massica di abrasivo: è direttamente legata allo spessore del taglio e alla durezza del materiale.
- ▶ Dimensioni dell'abrasivo: la granulometria è generalmente compresa tra 60 e 120 mesh. Per ogni materiale esiste un intervallo di dimensioni ottimale.
- ▶ Tipo di abrasivo: dipende dalla durezza del materiale da lavorare I più impiegati sono Garnet (granato), sabbia di olivina o di silice ed il carburo di silicio.

1.4 I vantaggi del Waterjet

In definitiva i vantaggi della tecnologia Waterjet possono essere riassunti nel modo seguente.

- ▶ Materiali: è possibile tagliare tutti i tipi di materiali, qualsiasi sia la loro consistenza, dal più fragile al più tenace.
- ▶ Precisione: il taglio è realizzato con precisione centesimale.
- ▶ Rapidità: i tempi di esecuzione sono particolarmente elevati, estrema flessibilità, con lo stesso utensile si ottiene qualsiasi forma.
- ▶ Integrità: assenza di sollecitazioni termiche e meccaniche che possono danneggiare le caratteristiche fisico-chimiche delle superfici; bave di lavorazione assai limitate anche per materiali duttili, consentendo di evitare processi di finitura post-lavorazione per eliminare sbavature.
- ▶ Spessori: possono essere tagliati materiali sottili e spessi fino a 150 mm.
- ▶ Economicità: il taglio è programmato in modo da sfruttare al massimo il materiale da tagliare. Vengono quindi minimizzati gli sfridi con evidenti benefici sui costi di lavorazione. Non ci sono problemi di usura per l'utensile.
- ▶ Utilizzo: La larghezza del solco di taglio del getto idroabrasivo è contenuta (non supera il millimetro quindi è contenuto anche lo sfrido generato dal taglio) ed inoltre il getto può iniziare a tagliare in qualunque punto della superficie per poi proseguire in ogni direzione.

Energia di taglio "modulabile" attraverso la scelta della pressione di lavoro e della sezione dell'orifizio di taglio.

Bloccaggio del pezzo semplice o addirittura inesistente perché il taglio avviene per l'applicazione di forze limitate dell'ordine delle decine di newton.

- ▶ Inquinamento: tecnologia assolutamente non inquinante, infatti vi è totale assenza di produzioni di fumi e polveri durante il taglio ed utilizzo di grassi od oli.

1.5 Gli svantaggi del Waterjet

- ▶ Trattamento delle acque: Nonostante la perdita ridottissima di materiale durante il taglio, questa tecnologia presenta lo svantaggio di produrre rifiuti secondari sottoforma di fanghi formati da acqua, dalla sostanza abrasiva e dal materiale asportato durante il taglio. Sebbene sia possibile separare e riutilizzare la sostanza abrasiva, risulta di solito più conveniente il trattamento e la messa a deposito quale rifiuto dei fanghi prodotti.
- ▶ Rumore: Inoltre un altro aspetto negativo di tale tecnologia riguarda il rumore, ma oggi giorno l'utilizzo di dispositivi di isolamento o riduzione del rumore hanno ridotto notevolmente il problema.
- ▶ Sicurezza: Le alte pressioni a cui lavorano i macchinari del Waterjet esigono di considerare il problema della sicurezza come un aspetto fondamentale, predisponendo opportune protezioni per gli operatori.
- ▶ Costi: I costi di questi macchinari non sono certo trascurabili, anche se con l'evolvere della tecnologia negli ultimi anni sono diventati accessibili.

2. Il Principio fisico

Le caratteristiche del getto idroabrasivo possono essere sintetizzate da un solo parametro “l’energia del getto idroabrasivo”. In seguito viene riportato il calcolo dell’energia cinetica del getto d’acqua con abrasivo.

2.1 Calcolo della velocità di efflusso dall’ugello primario

L’ugello primario ha il compito di trasformare l’energia di pressione posseduta dall’acqua in uscita dalla pompa in energia cinetica. E’ costituito da una struttura in acciaio inossidabile con un inserto in zaffiro sintetico. Lo zaffiro sintetico è il materiale più comunemente utilizzato per la realizzazione degli ugelli primari, grazie alla facile lavorabilità ed all’elevata resistenza all’usura. Il diametro del foro, in dipendenza delle applicazioni industriali, può variare tra 0,05 mm e 0,40 mm. La vita utile di un ugello varia tra le 30 e le 200 ore a seconda che l’acqua della rete idrica venga trattata o meno.

Considerando in prima approssimazione l’acqua come fluido incompressibile (ipotesi di fluido ideale) e stazionario, la trasformazione viene descritta dal principio di conservazione dell’energia tramite l’equazione di Bernulli:

$$\frac{P}{\rho_w g} + h + \frac{v^2}{2g} = cost \quad (2.1)$$

dove:

P è la pressione del fluido [MPa]

ρ_w è la densità del getto di acqua [Kg/m^3]

h è la quota piezometrica [m]

g è l’accelerazione di gravità [m/s^2]

v è la velocità del fluido [m/s]

applicando Bernulli al fluido tra l’ingresso (1) e l’uscita (2) dell’ugello primario si ottiene:

$$\frac{P_1}{\rho_w g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho_w g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.2)$$

essendo $P_2 \ll P_1$, $v_1 \ll v_2$ e $h_1 \cong h_2$ si può trascurare il loro peso pertanto dalla equazione 2.1 si calcola la velocità ideale v_{id} che coincide con la classica formula di Torricelli:

$$v_2 = v_{id} = \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}} \quad (2.3)$$

Per ottenere la velocità reale in uscita dall’ugello primario bisogna considerare le perdite energetiche all’interno dell’orifizio per mezzo di un coefficiente moltiplicativo, detto “coefficiente di efficienza”, che caratterizza la quantità di moto persa per attrito sulle pareti dell’ugello. Tale

coefficiente dipende oltre che dalla forma dell'ugello primario anche dal suo diametro e dalla pressione utilizzata.

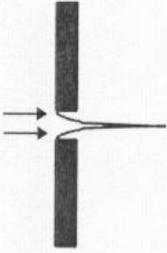
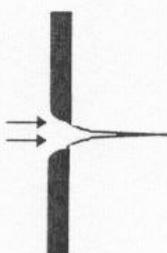
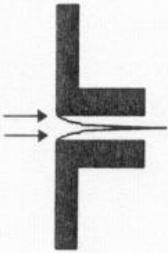
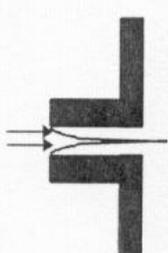
			
$\xi=0.61$ Forma a spigolo	$\xi=0.98$ Forma arrotondata	$\xi=0.80$ Tubo corto	$\xi=0.51$ Tubo inverso

Figura 2.1 – Coefficienti di efficienza per diverse forme di ugello

Da cui la velocità reale del getto di sola acqua all'uscita dall'ugello primario è data dalla relazione:

$$v_{re} = \xi \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}} \quad (2.4)$$

dove ξ è il coefficiente di efficienza ed è funzione di P , d_n (diametro ugello primario) e della geometria.

È importante osservare come la velocità del getto di acqua in uscita dall'ugello primario non dipenda da nessun parametro geometrico dell'ugello stesso. Inoltre, considerando le pressioni operative abituali, generalmente utilizzate per il taglio, l'acqua non può essere assunta incomprimibile, di conseguenza la sua densità risulta funzione del livello di pressione (Fig.2.2); da ciò deriva una velocità di efflusso calcolabile tramite la seguente equazione:

$$v_{com} = \sqrt{\frac{2L}{\rho_0(1-c)} \left[\left(1 + \frac{P}{L}\right)^{1-c} - 1 \right]} \quad (2.5)$$

Dove ρ_0 è la densità dell'acqua alla pressione atmosferica, $L=300$ MPa, $c=0,1368$. Tenendo presente che ad una pressione di circa 400 MPa l'acqua ha un coefficiente di comprimibilità del 12%, l'errore commesso è di qualche percento specie se si utilizza una densità media tra quella dell'acqua alla pressione atmosferica e quella alla pressione di esercizio.

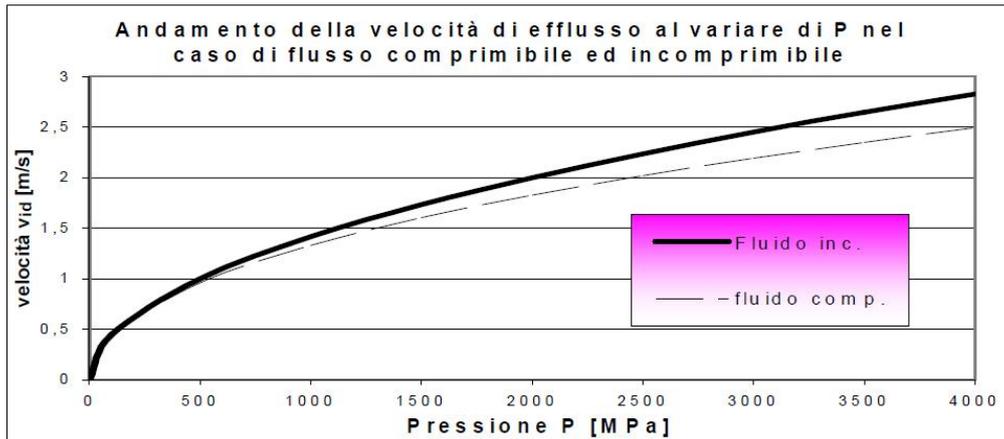


Figura 2.2 - Velocità di efflusso al variare della pressione per fluido comprimibile e non comprimibile

Possiamo inoltre determinare la portata volumetrica dell'acqua Q_w in uscita dall'ugello primario:

$$Q_w = A_w \cdot v_{re} \quad (2.6)$$

dove A_w è l'area di efflusso che è legata alla dimensione dell'orificio attraverso un coefficiente di scarica ($C_D < 1$) che dipende dalla geometria dell'ugello:

$$A_{getto} = A_{orificio} \cdot C_D \quad (2.7)$$

da cui:

$$Q_w = A_w \cdot v_{re} = \pi \cdot C_D \frac{d_n^2}{4} \xi \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}} \quad (2.8)$$

2.2 Calcolo della velocità in uscita dal focalizzatore

All'uscita dell'ugello primario, l'acqua ad alta velocità, penetra nella camera di miscelazione dove incontra il materiale abrasivo e l'aria aspirata per effetto Venturi. Come mostrato nella figura 2.3, dopo la miscelazione, all'interno dell'apposita camera, la miscela arriva all'ingresso del focalizzatore.

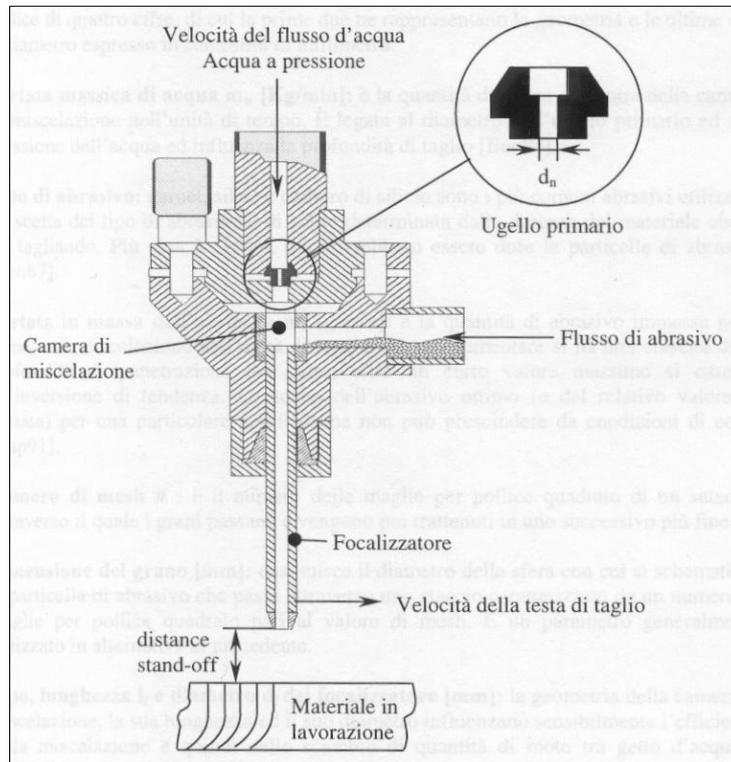


Figura 2.3 - Sezione della testa di taglio

All'uscita del focalizzatore il getto è composto quindi da una sospensione dalle tre fasi:

- aria che penetra all'interno della camera di miscelazione insieme alle particelle abrasive
- acqua, proveniente dall'accumulatore
- abrasivo, proveniente dall'apposito contenitore

La portata volumetrica totale la si può esprimere come somma di tre contributi:

$$Q_{tot} = Q_{aria} + Q_{acqua} + Q_{abrasivo} \quad (2.9)$$

$$(Q_{aria} = 0,95 Q_{tot})$$

da cui:

$$Q_{aria} = \frac{0,95}{0,05} (Q_{acqua} + Q_{abrasivo}) \quad (2.10)$$

note le densità a pressione ambiente: $\rho_{aria} = 1.14 \frac{Kg}{m^3}$ $\rho_w = 1000 \frac{Kg}{m^3}$

si può passare al calcolo della portata massica (riferita alla massa di un fluido) $\dot{m} = \rho \cdot Q$ [Kg/s]

Se si esegue un bilancio della quantità di moto tra l'ingresso della camera di miscelazione e l'uscita dal focalizzatore si ottiene :

Q.d.m. ingresso camera miscelazione = Q.d.m. uscita focalizzatore

$$\dot{m}_{aria}v_{aria} + \dot{m}_{abrasivo}v_{abrasivo} + \dot{m}_{acqua}v_{reacqua} = v_{iab}(\dot{m}_{aria} + \dot{m}_{abrasivo} + \dot{m}_{acqua})$$

essendo la densità dell'aria molto inferiore a quella dell'acqua, la portata massica di aria può essere considerata nulla; inoltre la velocità del materiale abrasivo all'ingresso della camera di miscelazione è piccola, sia perché l'abrasivo viene aspirato per effetto Venturi, sia perché il contenitore (tramoggia) si trova ad una quota superiore rispetto alla camera di miscelazione; possiamo quindi riscrivere la precedente equazione nel seguente modo:

$$\dot{m}_{acqua}v_{reacqua} = v_{iab}(\dot{m}_{abrasivo} + \dot{m}_{acqua}) \quad (2.11)$$

Ponendo:

$$r = \frac{\dot{m}_{abrasivo}}{\dot{m}_{acqua}}$$

si ottiene:

$$v_{iab} = \eta \frac{v_{reacqua}}{(1+r)} \quad (2.12)$$

dove v_{iab} è la velocità del getto idroabrasivo.

Il parametro η , definito "coefficiente di quantità di moto trasferita", tiene conto della quantità di moto trasferita durante la miscelazione tra il getto d'acqua ad alta velocità e l'abrasivo all'interno della apposita camera di miscelazione e nel tubo focalizzatore.

Il coefficiente di energia trasferita è funzione dei diversi parametri di processo tra i quali: la pressione della pompa (velocità del getto di acqua in uscita dall'ugello primario), la portata di abrasivo e la geometria della camera di miscelazione e del focalizzatore. Molti sono stati gli studi effettuati al fine di determinare il valore del coefficiente η in funzione dei diversi parametri di processo. I metodi si basano sulla misura delle forze di impatto del getto sulla superficie in lavorazione al fine di determinare la velocità reale dell'idrogetto in uscita dal focalizzatore.

Nel caso di basse portate di abrasivo il coefficiente di efficienza risulta essere compreso tra 0,60 e 0,81. Inoltre se la lunghezza ed il diametro del tubo di miscelazione sono sufficientemente elevati, può essere trascurata, all'uscita del focalizzatore, la velocità di scorrimento tra acqua e abrasivo. Questa analisi ci permette di affermare che la velocità del getto idroabrasivo è uguale alla velocità della singola particella:

$$v_{iab} = v_p \quad (2.13)$$

2.3 Calcolo dell'energia cinetica del getto di sola acqua

L'energia cinetica del getto di sola acqua in uscita dall'ugello primario può essere espressa dalla relazione:

$$E_w = \frac{1}{2} \dot{m}_{acqua} v_{re}^2 t \quad (2.14)$$

dove:

\dot{m}_{acqua} è la portata di acqua [Kg/s]

t è il tempo di esposizione [s]

La portata di acqua può essere determinata dalla semplice relazione:

$$\dot{m}_{acqua} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_n}{1000} \right)^2 v_{re} \rho_w \quad (2.15)$$

dove:

d_n è il diametro dell'ugello [mm]

Il tempo di esposizione può essere determinato invece dalla relazione:

$$t = \frac{\text{spazio}}{\text{velocità}}$$

Dove per spazio percorso si intende la lunghezza del provino mentre la velocità è quella di avanzamento della testa di taglio.

L'espressione della E_w , funzione dei parametri di processo quali, pressione, velocità di avanzamento della testa di taglio è:

$$E_w = 1,1102 \cdot \alpha \cdot \xi^3 \cdot \left(\frac{d_n}{1000} \right)^2 \cdot t \cdot \frac{p^{1,5}}{\sqrt{\rho_w}} \quad (2.16)$$

dove α è un numero adimensionale che considera la diminuzione della portata di acqua dovuta all'improvviso cambio nelle condizioni meccaniche del fluido all'uscita dell'ugello. Tipici valori di α per un ugello in zaffiro sono compresi tra 0,6 e 0,8.

2.4 Calcolo dell'energia cinetica del getto idroabrasivo

L'energia cinetica della singola particella abrasiva, supposta sferica, è data dalla seguente relazione:

$$E_p = \frac{\pi}{2} d_p^3 \rho_A v_p^2 \quad (2.17)$$

dove:

ρ_A è la densità del materiale abrasivo [Kg/m³]

d_p è il diametro della particella abrasiva [m]

v_p è la velocità della particella abrasiva [m/s]

Durante la miscelazione (acqua/abrasivo) l'energia cinetica del getto di acqua ad alta velocità è parzialmente assorbita dall'accelerazione delle particelle. La fase di miscelazione tra acqua e abrasivo è di fondamentale importanza ed è influenzata sia dai sistemi di iniezione delle particelle abrasive, sia dalla geometria della camera di miscelazione. Per migliorare questo aspetto vengono impiegati sistemi che impongono al getto un moto a spirale, all'interno della camera di miscelazione, o in alternativa sistemi che generano un flusso vorticoso. Un ulteriore interessante aspetto è che le particelle in questo processo di miscelazione tendono a rompersi: il 70% ÷ 80% delle particelle sono soggette a frammentazione. La percentuale dipende dalla dimensione del grano, dalla pressione della pompa e quindi la pressione con la quale l'acqua penetra nella camera di miscelazione e dal diametro del focalizzatore.

Da questa semplice analisi, l'energia cinetica della singola particella diminuisce con l'aumentare della portata di abrasivo e al diminuire del diametro medio della particella. E' inoltre possibile determinare approssimativamente, il numero di particelle di abrasivo contenute nella direzione di avanzamento del getto:

$$N_p = \frac{\dot{m}_{abrasivo}}{m_{p.abrasivo}} t \quad (2.18)$$

Il numero di particelle risulta quindi essere funzione della portata di abrasivo, della massa di abrasivo e del tempo di esposizione. La portata di abrasivo viene impostata direttamente sulla macchina mentre la massa di abrasivo può essere ottenuta semplicemente dalla relazione:

$$m_{p.abrasivo} = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_A \quad (2.19)$$

L'energia cinetica del getto idroabrasivo può essere ottenuta dalla seguente equazione:

$$E_{p-w} = \xi^2 \cdot \eta^2 \cdot \left(\frac{P}{\rho_w} \right) \cdot t \cdot \frac{\dot{m}_A \cdot \dot{m}_w}{\dot{m}_A + \dot{m}_w} \quad (2.20)$$

Dalla relazione precedente si può notare la dipendenza dell'energia del getto dai parametri di processo quali pressione, tempo (velocità di avanzamento) e portata di abrasivo.

3. Le principali applicazioni

La tecnica del taglio Waterjet è una delle più innovative e flessibile sul mercato ed ha trovato largo impiego in un gran numero di settori industriali.

Il taglio con abrasivo, non solo possiede la stessa versatilità del taglio con sola acqua, ma estende le sue applicazioni ai materiali duri. L'aggiunta di abrasivo permette infatti il taglio di metalli, vetri e materiali ceramici.

I principali settori di impiego del Waterjet sono:

- ▶ Settore lapideo
Marmi, Graniti, Ceramica, Porcellanato, Pietre.
(in particolare si sottolinea l'applicazione nello scavo di gallerie e tunnel)
- ▶ Settore edilizia ed architettura
Pavimenti intarsiati, bordi, top cucina e bagno, mosaici, balaustre, scale e pavimenti in curva, oggettistica, masselli.
- ▶ Settore vetro
Vetro piano, laminato, multistrato, blindato, a piombo, cristallo, specchio.
- ▶ Settore metalli
Acciaio Inox , ferro, alluminio, rame, ottone, titanio, argento, leghe in genere.
- ▶ Settori vari
Insegne luminose, materiali compositi, fibra di carbonio, nido d'ape, guarnizioni grafite, plexiglas, lexan, seghe circolari, pvc, teflon, nylon, articoli tecnici, ferodo.
- ▶ Settore taglio con solo acqua
Gomme, spugne, isolanti termici e acustici, guarnizioni, fibrocaramica, interni e tappeti d'auto, pelle e similpelle, cinture, gommoni, mute da sub, pannolini, alimentari surgelati e freschi, sughero, puzzle, cartone ondulato, zerbini personalizzati, suolette per scarpe, polistirolo, fibra di vetro, cartongesso.

Di seguito verranno elencate le principali lavorazioni effettuabili con tale tecnologia riportando di volta in volta esempi caratteristici nelle diverse applicazioni industriali.

3.1 Taglio

Una grande varietà di materiali può essere tagliata con la tecnologia Waterjet, sia con o senza l'utilizzo di abrasivo, ottenendo un'ottima qualità.

In questa applicazione la velocità di taglio dipende da diversi parametri, i principali sono la finitura superficiale richiesta (basse velocità per alte finiture), la pressione dell'acqua e di conseguenza dalla geometria dell'ugello, l'eventuale portata di abrasivo presente nell'acqua, l'angolo di incidenza del getto sul pezzo e la distanza stand-off dal pezzo stesso.

Sulla qualità del taglio incidono le diverse proprietà dei materiali da tagliare, esistono infatti velocità di taglio ottimali per ogni materiale. Per esempio il vetro ha una velocità di taglio ottimale doppia rispetto all'alluminio, 2 mm/s invece che 1 mm/s, mentre il titanio si ferma ad una velocità di 0,5 mm/s. La velocità di taglio inoltre è funzione anche dello spessore da tagliare ed in genere diminuisce all'aumentare dello spessore, anche se la relazione non è propriamente lineare.

Tagliando materiali ad alto spessore si presenta uno dei principali difetti di questa tecnologia, cioè la formazione di striature sulle superfici di taglio che ne pregiudicano la qualità. Tale fenomeno è maggiormente evidente all'aumentare delle velocità e dello spessore di taglio. Quando la velocità di taglio è abbastanza bassa il flusso idroabrasivo entra ed esce nello stesso punto, invece quando la velocità di taglio è più alta il punto di uscita del getto idroabrasivo è successivo al punto di ingresso, cioè vi è un ritardo di flusso dovuto al fatto che la velocità di taglio è superiore al processo di rimozione del materiale.

Quando avviene questo fenomeno la qualità del taglio diminuisce notevolmente ed il processo in tal caso può diventare anche instabile realizzando sempre striature sempre più larghe e facendo divenire la finitura superficiale inaccettabile per le diverse applicazioni.

In generale non ci sono materiali che non possono essere tagliati con la tecnologia Waterjet, ma tuttavia, bisogna prestare attenzione nella lavorazione di alcuni materiali per evitare la loro frantumazione o laminazione.

Recentemente infatti la tecnologia Waterjet ha trovato significativo impiego nell'industria dei materiali compositi, per esempio nel taglio delle componenti delle fusoliere degli aerei, come la realizzazione dei finestrini (figura 3.1).



Figura 3.1 - Fusoliera

Le macchine usate in questa operazione dispongono comunemente di un trapano che pre-fora il foro prima del taglio con il getto d'acqua. Questa operazione è realizzata per prevenire il rischio della delaminazione del materiale composito quando il taglio ad acqua è già iniziato. Il Waterjet infatti seguirebbe la linea di minor resistenza del materiale e penetrerebbe tra le fibre durante il taglio. Qualsiasi percorso a debole resistenza lungo lo strato di fibre del materiale potrebbe essere seguito dal getto idroabrasivo e piuttosto che continuare secondo il percorso impostato il getto potrebbe deviare lateralmente pregiudicando l'operazione di taglio. Comunque sia, se il getto è abbastanza compatto e potente la tendenza di questo fenomeno diminuisce.

Tuttavia a causa della natura dei materiali compositi, che portano con se la possibilità di difetti e imperfezioni tra gli strati, il rischio della delaminazione del foro di taglio è molto alto e quindi è comunemente usata la tecnica della pre-foratura con un trapano. Una volta che il foro è stato pre-forato il Waterjet non ha problemi durante la lavorazione siccome l'angolo di incidenza del getto idroabrasivo è già realizzato e l'acqua attraversa il materiale senza deviazioni.

Un altro esempio di applicazione nel taglio della tecnologia Waterjet riguarda i rivestimenti interni delle automobili. Questi sistemi di taglio hanno un aspiratore particolare che, dopo il processo di taglio vero e proprio, aspira immediatamente via l'acqua, così che i componenti rimangono quasi totalmente asciutti con solo un minimo assorbimento d'acqua.

3.2 Foratura

L'utilizzo della tecnologia Waterjet nella foratura è in forte aumento e può essere normalmente utilizzata per realizzare fori di diversi diametri (figura 3.2).

Interessano particolarmente questa tecnologia le forature su materiali difficili da lavorare, come materiali ceramici, materiali con matrice metallica e materiali compositi, data la difficoltà nella realizzazione di fori con altre tecnologie.

I requisiti sono simili al taglio e, per alcuni materiali va posta particolare attenzione all'inizio della operazione di foratura.

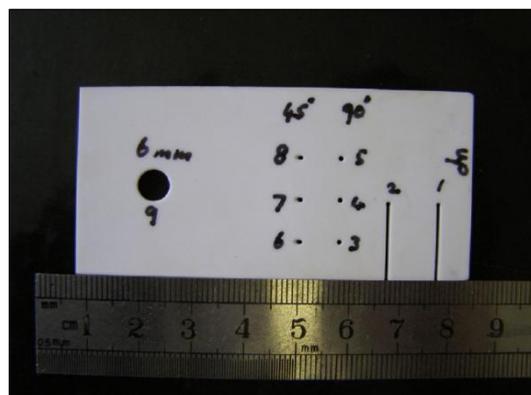


Figura 3.2 - Fori realizzati tramite Waterjet

Come per il taglio effettuato con il Waterjet la profondità nella foratura e la qualità del foro richiesto dipendono dal tipo di applicazione e dal tipo di processo richiesto.

I fori possono essere realizzati su materiali multistrato o rivestiti senza alcun problema. I fori possono essere realizzati con forma cilindrica o conica, come anche angolati.

Il Waterjet può lavorare quasi tutti i materiali e generalmente non ci sono problemi sebbene come prima menzionato nel paragrafo del taglio, particolare attenzione va fatta per forare i materiali fragili come il vetro, o materiali a strati che possono avere dei difetti come i compositi.

Il diametro dell'ugello utilizzato durante la foratura è tipicamente di 1 mm, e fori di dimensioni maggiori possono essere comunque eseguiti con tale diametro senza particolari problemi. Fori più piccoli possono essere realizzati tramite diametri dell'ugello e dell'orifizio minori.

La versatilità di questa tecnologia nella foratura permette di lavorare molti materiali come detto, e la richiesta di fori con diametri sempre più piccoli sta conducendo ad uno sviluppo di sistemi ad alte pressioni progettati appositamente per micro-fori. Oggi alcuni sistemi sono già disponibili ma sono ancora agli inizi e questa è un settore che nei prossimi anni avrà significativi sviluppi.

3.3 Fresatura

Il processo di fresatura tramite il Waterjet, con o senza abrasivo, è un'altra applicazione dove nei prossimi anni vedremo una significativa evoluzione.

La profondità di asportazione del materiale può essere controllata attraverso la velocità di taglio trasversale (basse velocità consentono penetrazioni maggiori), la pressione dell'acqua (maggiore è la pressione e maggiore è la penetrazione) e altri fattori.

Per alcune applicazioni di questo tipo può essere utilizzato un abrasivo integrativo, comunque ci sono modi per ridurre ciò, usando abrasivi insoliti come ad azoto liquido o sistemi a sola acqua.

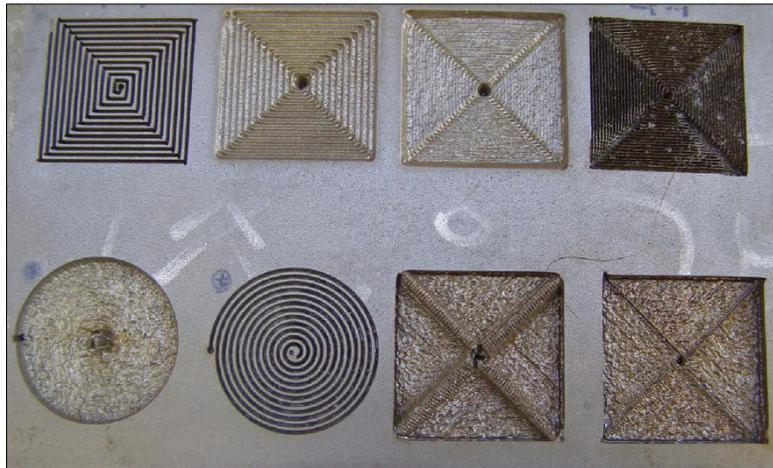


Figura 3.3 - Fresatura tramite Waterjet

Anche questa tecnologia è agli inizi e può essere usata in aree dove la consistenza della superficie, la forma e le eventuali perdite di peso sono tanto importanti come la realizzazione delle cavità.

Il Waterjet può essere usato in molte innovative applicazioni che riguardano la realizzazione di particolari superfici, come le alette per gli scambiatori di calore e superfici che richiedono particolare adesione.

3.4 Preparazione delle superfici, pulizia e rimozione del rivestimento

Negli ultimi dieci anni si sono resi disponibili i sistemi “turn-key” per rimozione di materiali e per la pulizia di componenti di motori o altro. Questi sistemi possono essere di sola acqua o possono includere alcuni abrasivi, come grani di vetro.

Questo tipo di applicazioni utilizzano il Waterjet, per rimuovere ad esempio le protezioni termiche dai motori a propellente solido degli space shuttle's ed asportare le vernici ed i rivestimenti dalle pale degli elicotteri, dagli scafi delle navi, come pulire le guarnizioni dei motori degli aerei.

I vantaggi che vengono portati dall'utilizzo di tale tecnologia includono la non rimozione del materiale base durante la pulizia, la non deformazione superficiale del materiale stesso, nessun deposito di abrasivo sulle parti o nei componenti dei macchinari, la riutilizzabilità dell'acqua, la più rapida pulizia rispetto ai normali processi chimici ed soprattutto un minor impatto ambientale.

3.5 Pallinatura

La pallinatura con il Waterjet consiste nel collocare un provino sotto il getto sottoponendolo ad una pressione d'acqua in aria o sottoacqua. Il risultato di tale operazione è uno stress di compressione generato sul provino, e dipende dai parametri del Waterjet, del materiale e dalla configurazione del sistema stesso.

I futuri impieghi mostrano che questo metodo può essere applicato per ridurre le tensioni residue nelle saldature o nei metalli degli impianti ortopedici.

La pallinatura può essere usata anche come cavitazione. Qui le bolle formate come risultato della cavitazione implodono sul provino producendo un alto stress in profondità.

3.6 Formatura

La formatura attraverso il water jet è agli inizi. La ricerca in quest'area è stata limitata fino ad oggi e richiederà nel futuro significativi investimenti per ottenere i risultati voluti.

3.7 Taglio con sola acqua

Si elenca ora di seguito un insieme di applicazioni del Waterjet che vengono effettuate con sola acqua per diversi motivi, sia tecno-economici sia di salute tagliando materiali che entrano in diretto contatto con l'uomo:

- taglio perimetrale di circuiti stampati
- taglio di lastre
- taglio di materiali leggeri rinforzati con fibre
- integrazione nei sistemi automatizzati
- taglio dei cavi
- taglio inclinato dei tessuti
- taglio di alimenti
- taglio dei tessuti

Il taglio perimetrale di circuiti stampati: questa applicazione mostra i diversi vantaggi del Waterjet. Il processo tipicamente riguarda la rimozione di diversi riquadri da una lastra principale, sia tagliando l'intero perimetro del circuito e sia tagliando le sole alette di sostegno del circuito stesso dalla tavola principale (figura 3.4). Questi metodi hanno permesso la possibilità di automatizzare la produzione di circuiti stampati.

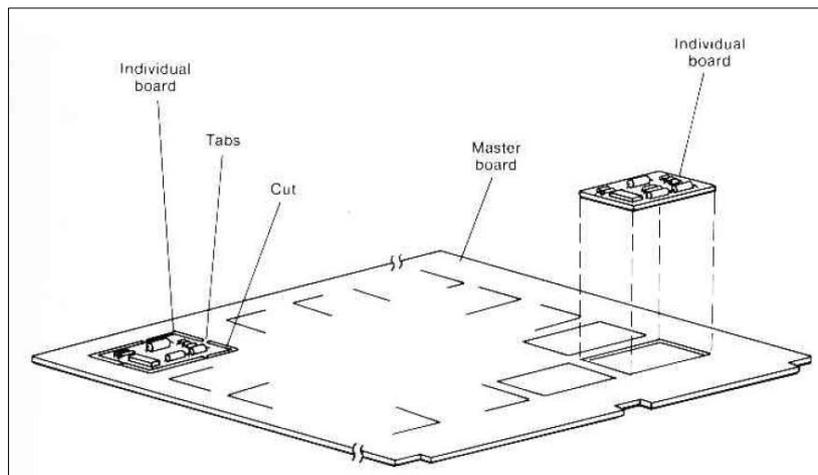


Figura 3.4 - Taglio dei circuiti stampati

Il Waterjet permette di effettuare tagli di forme e dimensioni diverse. Il piccolo diametro del getto d'acqua permette di passare vicino ai componenti montanti sul bordo del circuito senza danneggiarli, e senza creare forze laterali aggiuntive.

Si potrebbe pensare che l'utilizzo di tale tecnologia introduca dell'acqua fra le lamine dei circuiti, ma diversi studi hanno concluso che non c'è nessun effetto negativo.

Il taglio di lastre: il Waterjet applica basse forze sul bordo delle lastre durante il taglio. Questo produce un'alta qualità del bordo. La velocità di taglio può essere spesso raddoppiata pur mantenendo un'ottima finitura del taglio.

Integrazione nei sistemi automatizzati: il Waterjet può essere facilmente integrato in un sistema automatizzato. Trova larga applicazione nell'industria automobilistica, soprattutto per quanto riguarda il taglio di materiali plastici rinforzati con fibre.

Taglio dei cavi: la capacità del Waterjet con sola acqua di tagliare i materiali isolanti ma non i metalli lo rende uno strumento utile nella rimozione del rivestimento dei cavi. Il taglio è notevolmente veloce ed è ridotto lo sfrido. Il Waterjet inoltre taglia l'isolante dei fili senza unire la copertura di rame al cavo.

Taglio inclinato dei tessuti: il taglio inclinato dei tessuti è facilmente eseguito con il Waterjet. Sono usati correntemente due sistemi di taglio. Il primo sistema (figura 3.5), consiste nel fissaggio dell'ugello al materiale da tagliare durante il suo movimento su di un nastro trasportatore. Mentre è fissato ed il materiale si può muovere, il getto è diretto perpendicolarmente attraverso il materiale. Dopo aver effettuato il taglio l'ugello rilascia la presa sul materiale e ritorna nella posizione iniziale. Il processo di taglio si ripete ciclicamente.

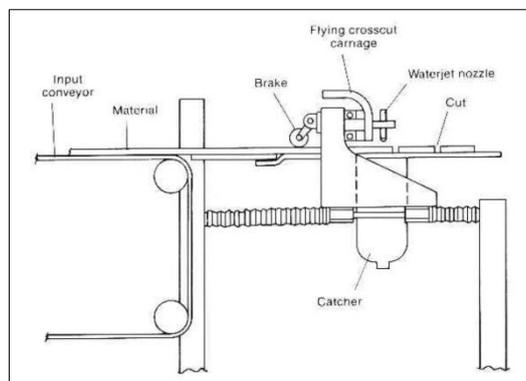


Figura 3.5 - Taglio dei tessuti

Il secondo sistema (figura 3.6), consiste in un meccanismo di taglio inclinato. In questo metodo la direzione del getto d'acqua non è perpendicolare al movimento di alimentazione del materiale, ma è caratterizzato da un angolo. Quest'angolo del getto è compensato dal movimento del materiale, ed il risultato è un taglio ortogonale. Il sistema correntemente monitorizza la velocità del materiale da tagliare, e varia la velocità del getto d'acqua.

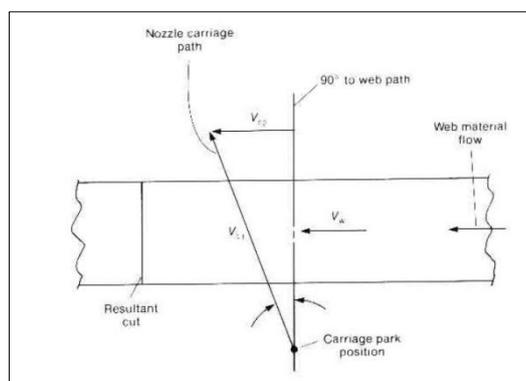


Figura 3.6 - Taglio dei tessuti

Entrambi i metodi riducono le parti di materiale tagliate non correttamente rispetto ai normali processi di taglio.

Taglio di alimenti: I meccanismi convenzionali di taglio meccanico, tendono a rompere gli alimenti da tagliare. Le basse forze applicate dal Waterjet con sola acqua permettono di ridurre tale danneggiamento dal 40%÷60% al 2% circa, garantendo inoltre una maggiore igiene.

Taglio dei tessuti: una principale applicazione del taglio dei tessuti riguarda l'industria dei pannolini. Il Waterjet è utilizzato per ritagliare il contorno del materiale con un sistema ad alta velocità. Il getto si muove lateralmente dentro e fuori il contorno del tessuto tagliando la forma desiderata.

4. Analisi di una lavorazione

Viene ora analizzata una generica operazione di taglio di una lastra di acciaio tramite un sistema Waterjet convenzionale con abrasivo.

Le dimensioni della lastra sono 900x300x20 mm (figura 4.1), e ci si prefigge di dividerla simmetricamente in due parti uguali.

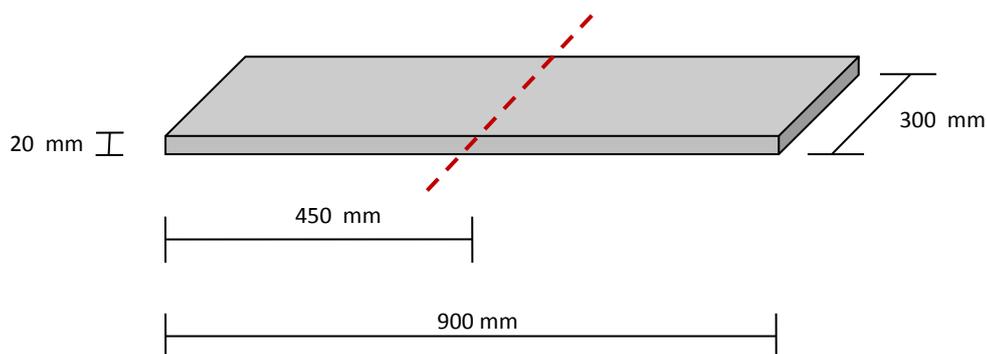


Figura 4.1 - Lastra di acciaio inossidabile

Le variabili che determinano la scelta di tali parametri sono essenzialmente tre:

- Tipo di materiale da tagliare
Definisce le dimensioni dell'orifizio e del rispettivo focalizzatore, il quale determina la larghezza del taglio. La dimensione dell'orifizio varia in funzione del tipo di materiale e del suo spessore, determinando inoltre la portata d'acqua necessaria.
- Velocità di taglio
Definisce il numero di teste di taglio necessarie per soddisfare i requisiti produttivi. La velocità della testa di taglio varia in funzione dello spessore del materiale, della pressione di esercizio, della qualità e quantità di abrasivo, ma soprattutto dalla finitura e qualità di taglio desiderata.
- Dimensione e numero degli orifizi
Stabilisce la portata d'acqua che l'intensificatore deve erogare.

Nel nostro caso il materiale da tagliare è un acciaio inossidabile avente uno spessore di 20 mm. La qualità del taglio può essere considerata media, essendoci prefissati solamente di dividere la lastra in due parti uguali.

Per la scelta dei parametri di processo si fa riferimento al catalogo della KMT Waterjet relativo all'intensificatore ad alta pressione STREAMLINE™ SL-V.

Per prima cosa viene scelto sul catalogo il materiale da lavorare ed il relativo spessore di taglio, e successivamente in base alla qualità da ottenere il diametro dell'ugello primario e la relativa velocità di taglio (figura 4.2).

Materiali per taglio idroabrasivo		Diametro dell'orefizio [mm] / Tubo di focalizzazione [mm]			
		0,17 / 0,54	<u>0,25 / 0,76</u>	0,30 / 0,90	0,35 / 1,10
Materiale	Spessore [mm]	Velocità di taglio [mm/min]			
Alluminio	5	315 – 470	595 – 855	750 – 1200	970 – 1470
	10	140 – 215	270 – 385	340 – 540	440 – 665
	20	65 – 95	120 – 175	155 – 245	200 – 300
Acciaio Inossidabile	5	110 – 160	205 – 295	255 – 410	335 – 505
	10	50 – 75	95 – 135	115 – 185	150 – 230
	<u>20</u>	25 – 35	<u>45 – 60</u>	55 – 85	70 – 105
Titanio	5	125 – 190	235 – 340	300 – 480	385 – 585
	10	60 – 85	105 – 150	135 – 215	175 – 265
	20	25 – 40	50 – 70	60 – 100	80 – 120
Marmo	10	350 – 440	555 – 800	705 – 1130	910 – 1380
	20	160 – 200	255 – 360	320 – 510	410 – 625
	40	70 – 90	115 – 160	145 – 230	185 – 280
Vetro	5	520 – 780	980 – 1420	1240 – 1995	1610 – 2440
	10	235 – 350	445 – 635	560 – 890	725 – 1100
	20	105 – 160	200 – 290	255 – 405	330 – 495

a 3.600 – 4.136 bar; portata di abrasivo 250 – 450 g/min; qualità della superficie: medio - fine

Figura 4.2 - Parametri di processo

Ora in base alle dimensioni dell'orifizio si sceglie la testa di taglio per getto idroabrasivo che meglio soddisfa le nostre condizioni di lavoro (figura 4.3).

Materiale	Spessore	Velocità di taglio
Acciaio inox	10	135
	40	32
Titanio	10	150
	40	30
Alluminio	10	385
	40	78
Marmo	10	800
	40	160
Granito	10	685
	40	135
Vetro	10	635
	40	130
Unità	mm	mm/min

Pressione 4.136 bar; portata abrasivo 450 g/min; combinazione testa Autoline 0,25/0,76 qualità della superficie: medio - fine



AUTOLINE™ II – Componenti

- 1 Corpo esterno
- 2 Guida ingresso abrasivo
- 3 Manicotto
- 4 Orifizio in diamante
- 5 Camera di miscelazione LONGLIFE
- 6 Corpo interno
- 7 Vite fissaggio Focalizzatore
- 8 Focalizzatore LONGLIFE
- 9 Protezione

Figura 4.3 - Testa di taglio idroabrasivo

La scelta è ricaduta sul modello ACTIVE AUTOLINE™ II con diametro dell'ugello primario di 0,25 mm e del focalizzatore di 0,76 mm, che può tagliare spessori compresi tra i 10 e 40 mm e può operare con una velocità di taglio compresa tra 135 e 32 mm/min; valori che soddisfano a pieno i parametri precedentemente suggeritoci dal catalogo dell'intensificatore.

Per quanto riguarda la distanza stand-off, essa è il meno critico dei parametri, infatti entro i 25-30 mm, cambiando poco la forma del getto, lo stand-off può considerarsi un parametro fisso. Se si esagera con la distanza di stand-off, il getto invece di tagliare esercita sul materiale solo un'azione erosiva limitata, oppure aumentano le dimensioni del solco di taglio facendo diminuire di conseguenza lo spessore che è possibile tagliare.

Per quanto riguarda il tipo di abrasivo da utilizzare, la scelta è ricaduta su uno degli abrasivi più utilizzati nella pratica il Garnet (granato). La granulometria ottimale per il taglio dell'acciaio inossidabile suggerita dalla KMT Abrasive è di 80 mesh. La portata di abrasivo invece consigliata è di 450 gr/min (figura 4.3).

Il tempo necessario al taglio della lastra in esame, in base alla velocità di taglio scelta, è stimato in circa 5 minuti e non si rendono necessarie ulteriori passate.

I parametri di processo scelti relativi alla lavorazione sopra descritta, vengono riassunti nella tabella 4.1 a seguire.

Parametro	Valore
<i>Pressione dell'acqua</i>	<i>4136 bar</i>
<i>Velocità di avanzamento</i>	<i>60 mm/min</i>
<i>Diametro ugello primario</i>	<i>0,25 mm</i>
<i>Diametro focalizzatore</i>	<i>0,76 mm</i>
<i>Distanza stand-off</i>	<i>30 mm</i>
<i>Portata di abrasivo</i>	<i>450 gr/min</i>
<i>Tipo di abrasivo</i>	<i>Garnet</i>
<i>Dimensioni abrasivo</i>	<i>80 mesh</i>
<i>Numero di passate</i>	<i>1</i>
<i>Inclinazione del getto</i>	<i>90°</i>
<i>Tempo di lavorazione</i>	<i>5 min</i>

Tabella 4.1 - Parametri di processo

5. Stato dell'arte

Lo stato dell'arte nell'ambito della tecnologia Waterjet, riguarda principalmente l'evoluzione tecnologia delle macchine di lavorazione, in particolar modo la sempre maggior potenza delle pompe, che spingono il getto d'acqua a pressioni fino a qualche anno fa inimmaginabili.

Al momento attuale infatti è possibile arrivare fino ad una pressione dell'acqua di 6000 bar (600MPa), il che vuol dire un aumento della pressione del 45% rispetto alle pompe tradizionalmente adottate negli ultimi anni. In queste condizioni il getto d'acqua viene accelerato fino a 1000 m/s indipendentemente dal materiale o dallo spessore, garantendo velocità di taglio maggiore del 50% circa.

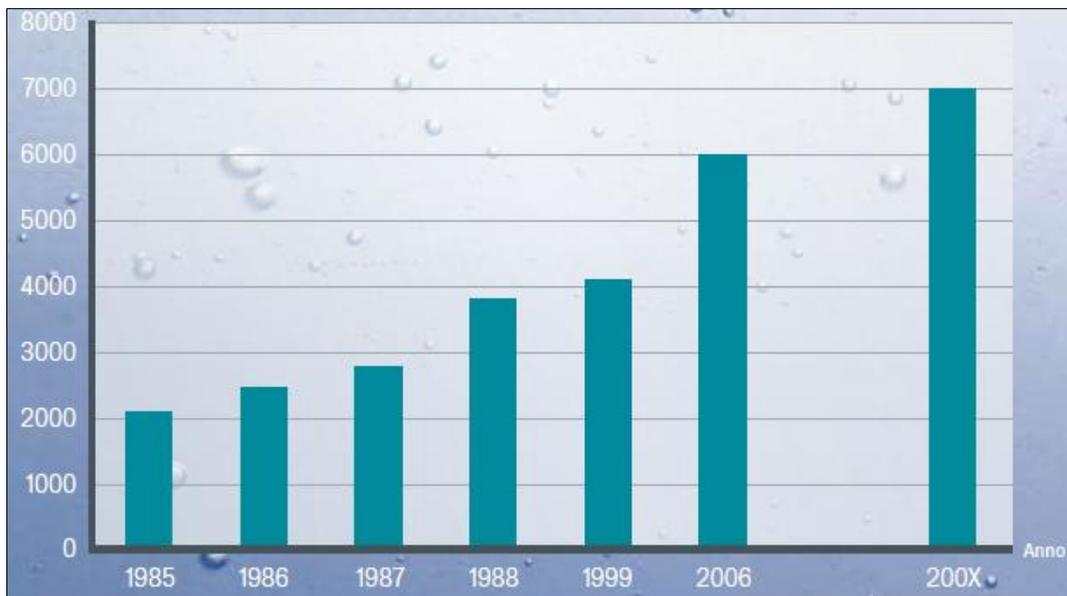


Figura 5.1 - Evoluzione negli anni della pressione dell'acqua

La maggior pressione dell'acqua si traduce anche in un aumento della produttività, già per altro ottima con i vecchi sistemi, e nello stesso tempo grazie all'elevata tecnologia con cui sono state sviluppate, queste nuove pompe di pressione hanno costi di gestione limitati, che si traduce in un contenimento dei costi operativi e in un aumento della produttività sopra citata.

Il risparmio in queste condizioni di lavoro si ripercuote anche sull'utilizzo dell'abrasivo, infatti è possibile risparmiare dal 30 al 50% di abrasivo per pezzo lavorato.

In totale si stima che rispetto ad un sistema tradizionale Waterjet a 4000 bar, i costi di lavorazione per pezzo, possono essere ridotti sino al 30%.

Come si evince dalla figura 5.1, il limite di pressione dell'acqua per questi sistemi non è ancora stato raggiunto e nei prossimi anni si arriverà anche alla soglia dei 7000 bar.

L'altro ambito in cui l'evoluzione tecnologica ha reso queste tecnologia sempre più "appetibile" è lo sviluppo di software a controllo numerico che migliorano notevolmente la precisione e la qualità delle lavorazioni.

Un effetto naturale quanto indesiderato della tecnologia di taglio Waterjet convenzionale, è la produzione di bordi di taglio conici e di una leggera erosione sugli spigoli interni dal lato di uscita del getto. Tutto ciò, influisce sulla precisione geometrica del pezzo, peggiorandola e spesso rendendo necessaria una lavorazione di finitura o ripresa del pezzo (figura 5.2).

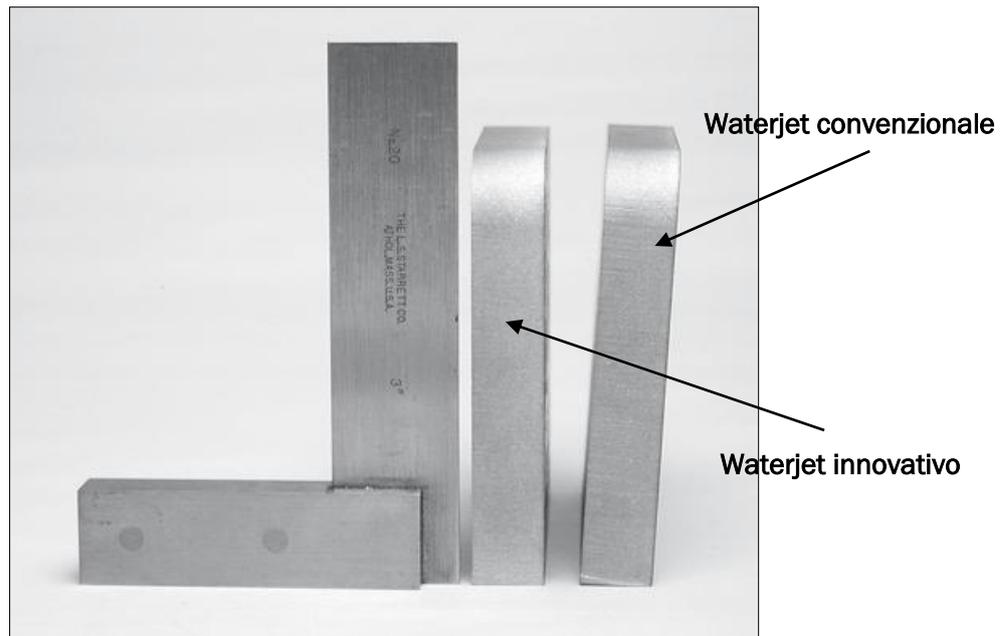


Figura 5.2 - Eliminazione difetti di taglio

Attraverso invece l'utilizzo di questi nuovi software, che si basano su un sistema con controllo di tolleranza attivo (Active Tolerance Control), si realizzano pezzi più precisi a velocità di taglio notevolmente superiori rispetto a quelle ottenute da un sistema a getto d'acqua convenzionale.

Il sistema è composto da un piccolo polso articolato collegato alla testa di taglio, il quale viene comandato da un software di nuova concezione che integra modelli di taglio matematici. Il polso consente alla testa di taglio di inclinarsi in qualsiasi direzione, compensando il ritardo del flusso acqua-abrasivo e l'errore di conicità che si verificano con le macchine di taglio a getto d'acqua convenzionali.

Ritardo di flusso e conicità, sono effetti naturali ma indesiderati della tecnica di taglio con Waterjet. Maggiore è la velocità di taglio maggiore è il ritardo di flusso con conseguente peggioramento della precisione dei pezzi tagliati. Con un sistema di taglio Waterjet convenzionale, è quindi necessario ridurre notevolmente la velocità di taglio se si vogliono ottenere pezzi con tolleranze accettabili.

Da oggi, grazie a questi sistemi, le limitazioni sono superate e la competitività del taglio a getto d'acqua raggiunge livelli sino ad ora impensabili (figura 5.3).

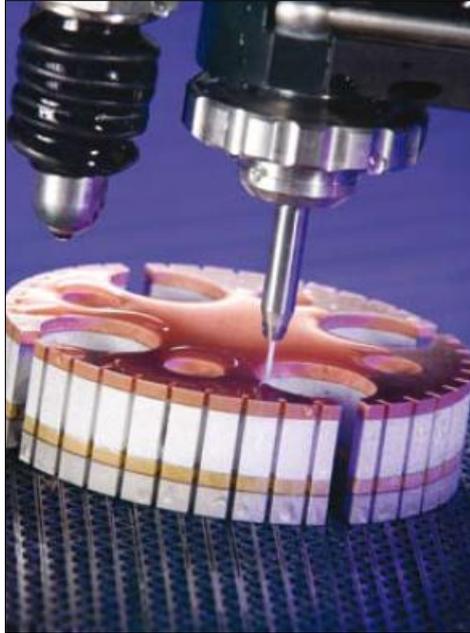


Figura 5.3 - Elementi ad alta precisione

Uno dei limiti maggiori del classico taglio ad acqua era legato al numero di assi su cui il controllo numerico effettua la regolazione del getto per eseguire i tagli desiderati. L'utilizzo di soli 3 assi (assi lineari X-Y-Z), infatti consente il taglio unicamente di geometrie bidimensionali, seppur complesse.

La nuova macchina di taglio ad acqua a 5 assi, che hanno in aggiunta ai tre assi lineari due assi di rotazione uno fisso ed uno orientabile, superano questi limiti permettendo tagli secondo definite geometrie tridimensionali. Con la Waterjet a 5 Assi è possibile effettuare, oltre al taglio perpendicolare al piano di lavoro, anche tagli inclinati, con inclinazioni fino a 60° (figura 5.4).



Figura 5.4 - Waterjet a 5 assi

Bibliografia

[1] GSG, www.gsg.it

[2] Waterjet s.r.l, www.waterjetcorp.com

[3] Attrezzeria Olonia, www.attrezzeriaolonia.it

[4] Flow Europe, www.floweurope.com

[5] Water Jetting Directory, www.waterjettingdirectory.com

[6] Università degli studi di Cassino, www.scuoladottoratoingegneria.unicas.it

[7] KTM Waterjet, www.kmt-waterjet.it