Il taglio a getto d'acqua è un processo di produzione straordinario, con un'ampia gamma di applicazioni avanzate in molti settori industriali, come quello **meccanico, aeronautico, biomedico, elettronico, del marmo e della pietra, dei materiali compositi, del vetro, della ceramica...**

■ Massimiliano Annoni

# Il gemello digitale del getto d'acqua

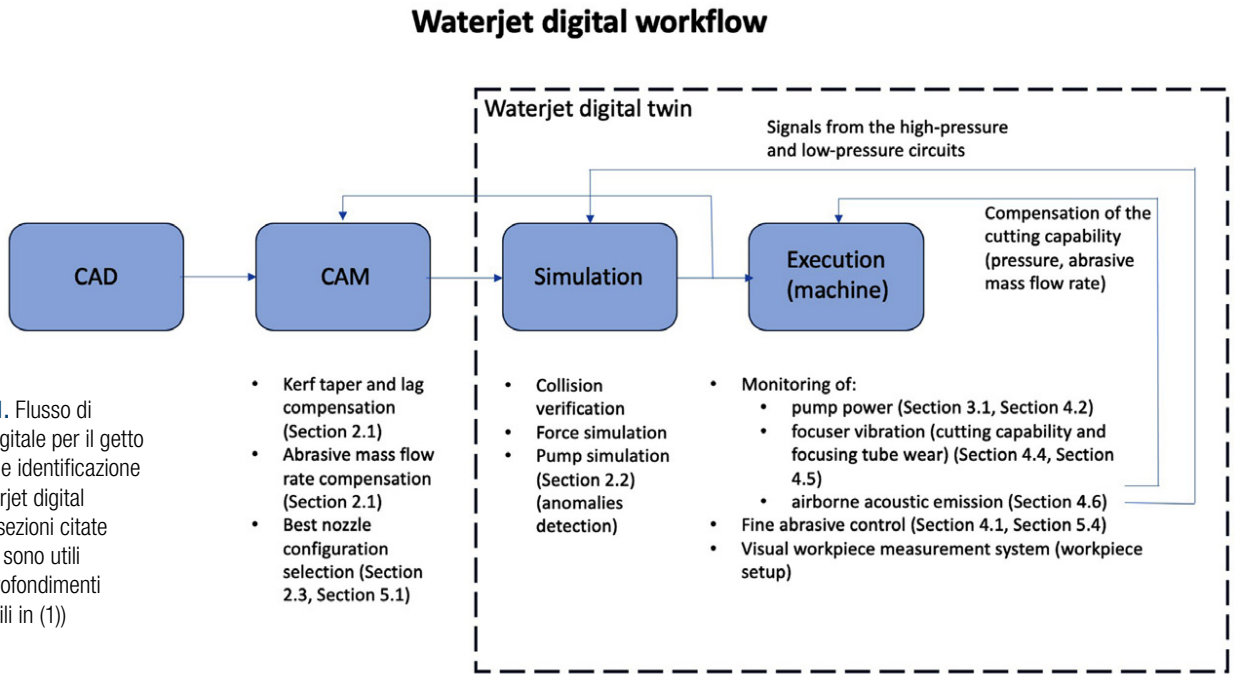



**Figura 1.** Flusso di lavoro digitale per il getto d'acqua e identificazione del waterjet digital twin (le sezioni citate in figura sono utili per approfondimenti disponibili in (1))

Questo articolo prende ispirazione dall'articolo di review (1) per riflettere retrospettivamente sugli studi di ricerca condotti al WJ_Lab, il laboratorio Waterjet del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano in 25 anni di ricerca, per evidenziare quali parti di quella ricerca possano essere considerate importanti per il settore e in grado di resistere alla prova del tempo, risultando ancora oggi efficaci e utili. L'articolo (1) è open access, quindi può essere letto liberamente da chi fosse interessato.

Le categorie di ricerca svolte nel tempo presso il WJ_Lab e descritte in (1) sono:

- Modellazione di processo
- Sensori e misurazioni
- Monitoraggio e controllo
- Prestazioni dei componenti
- MicroAWJ

## Applicazioni

I nomi delle categorie sono autoesplicativi, ma vale la pena sottolineare in questa introduzione come, secondo l'opinione dell'autore, esse coprano la maggior parte degli aspetti della ricerca su un processo di lavorazione, almeno per quanto riguarda il punto di vista meccanico.

Questo articolo intende rendere l'esperienza del WJ_Lab utile per il futuro, sintetizzandola e delineando un concetto già esistente per altri processi produttivi: il gemello digitale del getto d'acqua (o waterjet digital twin). La ricerca del WJ_Lab converge su questo concetto, che conferisce ad essa un significato tecnologico ancora più forte.

## Waterjet Digital Twin

L'autore è convinto che l'obiettivo più importante per i ricercatori che si occupano di getto d'acqua e considerano il miglioramento industriale di questo processo come un obiettivo rilevante, sia quello di concentrare i propri sforzi su un gemello digitale del getto d'acqua, secondo la sua definizione, ovvero un modello completo della macchina e del processo in grado di scambiare dati con il gemello reale, con lo scopo di:

- Migliorare la capacità di progettare nuovi cicli di taglio a getto d'acqua
- Migliorare la qualità finale sul pezzo in modo economico e sostenibile
- Prevedere e prevenire i danni all'impianto e al pezzo in lavorazione
- Programmare la manutenzione

Questa tendenza è già in atto per altri processi come la fresatura e l'EDM, mentre il getto d'acqua soffre un certo ritardo.

Questo articolo cerca di elaborare l'esperienza del WJ_Lab descritta in (1) per dimostrare come essa possa essere riorganizzata per definire un primo concetto di gemello digitale del getto d'acqua.

La Figura 1 aiuta a guidare questa discussione. Essa rappresenta un flusso di lavoro digitale per la progettazione e l'esecuzione di un'operazione di taglio a getto d'acqua. Una parte di questo flusso può essere considerata come il gemello digitale del getto d'acqua, come evidenziato nell'immagine.

## Modellazione di processo

L'esperienza del WJ_Lab nella modellazione del processo applicata a WJ (waterjet) e AWJ (abrasive waterjet) fornisce alcuni spunti importanti sul cammino verso il gemello digitale del getto d'acqua:

- La CFD (Computational Fluid Dynamics) è uno strumento utile per indagare il comportamento fisico dei fluidi e delle particelle all'interno di una testa di taglio e aiuta nella fase di progettazione dei componenti del getto d'acqua. Il WJ_Lab ha fatto uso della CFD per comprendere meglio i fenomeni legati al getto d'acqua nel percorso verso il microAWJ. D'altro canto, la CFD non rientra tra i blocchi costitutivi del gemello digitale del getto d'acqua, poiché,

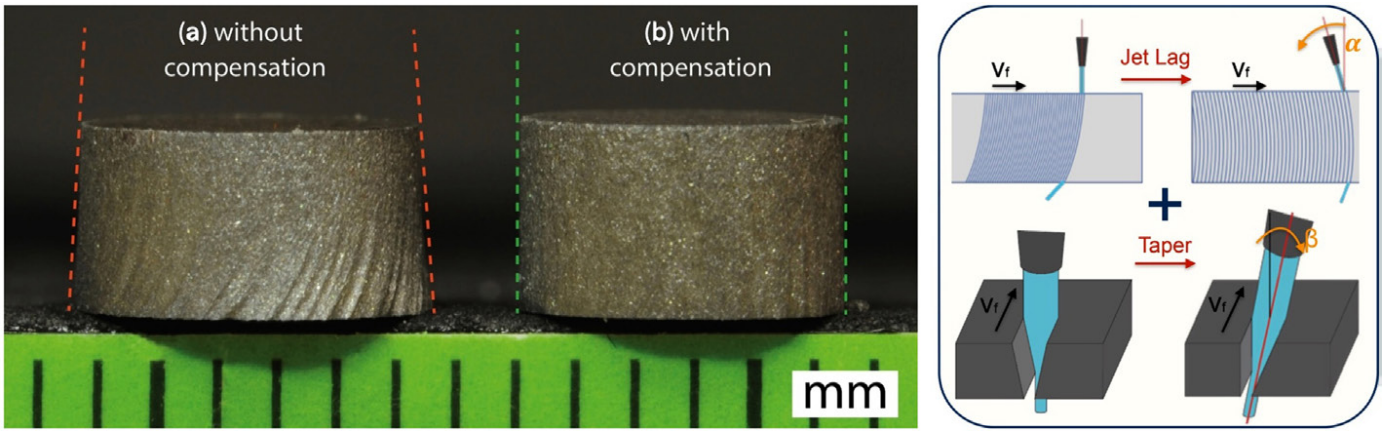



**Figura 2.** Esempio di compensazione ottenuta al WJ_Lab. Le linee tratteggiate indicano l'inclinazione delle pareti del pezzo. Nel caso (b), il pezzo è cilindrico

almeno per ora, non è abbastanza veloce e deve essere eseguita in modalità offline.

- Quando si trattano applicazioni industriali, i modelli empirici o semiempirici sono più adatti a descrivere l'interazione tra getto d'acqua e materiale. Infatti, la geometria del kerf (il solco di taglio del getto d'acqua) può essere prevista e compensata per ottenere un kerf a pareti verticali che possa soddisfare anche tolleranze strette, come avviene nelle applicazioni microAWJ. La compensazione può essere eseguita in due modi. Il primo è banale ed è basato sulla selezione della corretta velocità di avanzamento per ottenere un'inclinazione nulla. Questa scelta è applicata nel taglio ad alta precisione, dove la produttività non è il vincolo principale. Inoltre, mantenere bassa la velocità di avanzamento, come richiesto per ottenere una inclinazione nulla, è fondamentale per mantenere bassa la rugosità superficiale, che è sempre un obiettivo nel taglio ad alta precisione e nel microAWJ. Il secondo modo per ottenere un'inclinazione nulla è inclinare la testa di taglio lungo la direzione di avanzamento e nella direzione trasversale per compensare la curvatura del front di taglio (jet lag) e l'inclinazione del kerf. Questa soluzione consente velocità di avanzamento più elevate, anche se può portare a elevata rugosità e ondulazione. Il concetto è alla base del brevetto Flow Dynamic Waterjet®. Il WJ_Lab ha lavorato su questo tipo di compensazione con varie tesi (Figura 2), ma i risultati sono coperti da accordi di riservatezza e non possono essere pubblicati. Di certo, entrambe le strategie dovrebbero essere incorporate in un sistema CAM (Computer Aided Manufacturing) per getto d'acqua per progettare cicli produttivi più rapidi quando le tolleranze dimensionali sono il vincolo principale (Figura 1, blocco CAM).
- Un possibile perfezionamento della strategia di compensazione del kerf potrebbe essere fatto adattando la portata di abrasivo lungo il percorso utensile, ad esempio vicino ai cambi di direzione. Il sistema CAM potrebbe usare questa strategia nella fase di progettazione del ciclo di lavorazione e un dosatore di abrasivo adatto potrebbe eseguire un controllo fine a questo scopo (Figura 1, blocco CAM). Si tratta di un intervento di secondo ordine, che diventa interessante solo se si vuole perseguire il massimo di accuratezza possibile.
- Un gemello digitale del getto d'acqua deve includere la pompa. La pompa è stata modellata in passato usando Modelica® (1). Questo tipo di modello potrebbe essere estremamente utile sia nella fase di progettazione di una nuova pompa, sia come

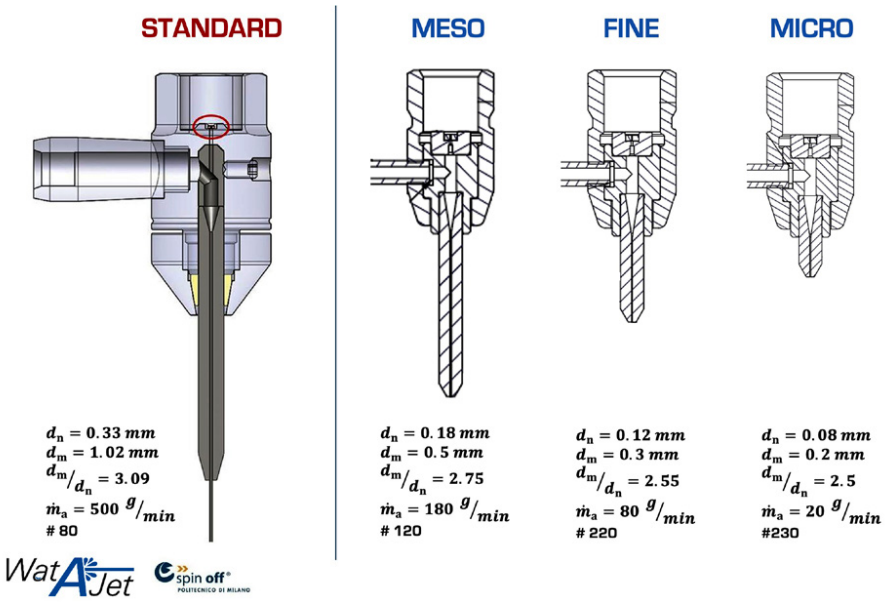



**Figura 3.** Teste di taglio AWJ (cerchiato in rosso l'orifizio; in grigio l'ugello focalizzatore) (cortesia WatAJet s.r.l.)

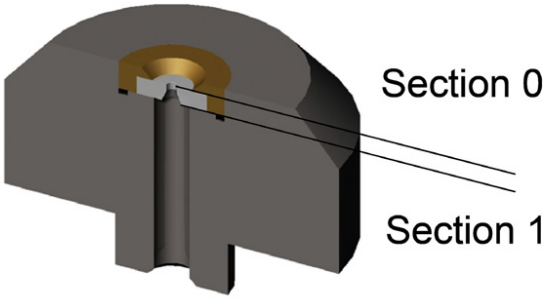
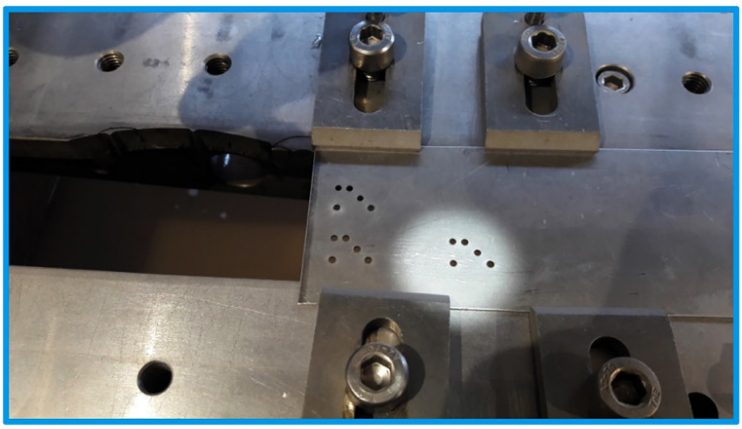



**Figura 4.** Orifizio (o ugello primario)



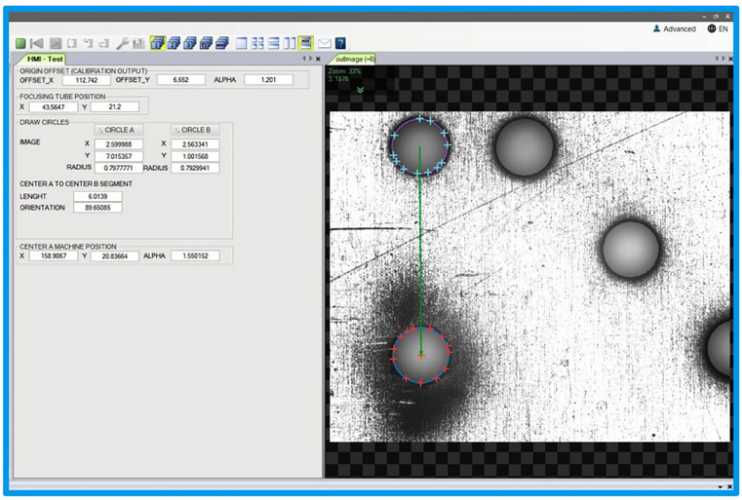


**Figura 5.** Uso di un sistema di visione installato a bordo di una macchina di taglio AWJ per riferire le lavorazioni a feature preesistenti (in questo caso, fori)(cortesia WatAJet s.r.l.)

blocco costitutivo del gemello digitale del getto d'acqua, poiché può prevedere i segnali della pompa in diverse posizioni lungo i circuiti a bassa e alta pressione (Figura 1, blocco di simulazione). Se il modello è tarato correttamente, fornisce il segnale nominale che può essere usato da uno strumento di monitoraggio per confrontarlo con i segnali reali, al fine di rilevare anomalie e fermare la macchina o programmare operazioni di manutenzione.

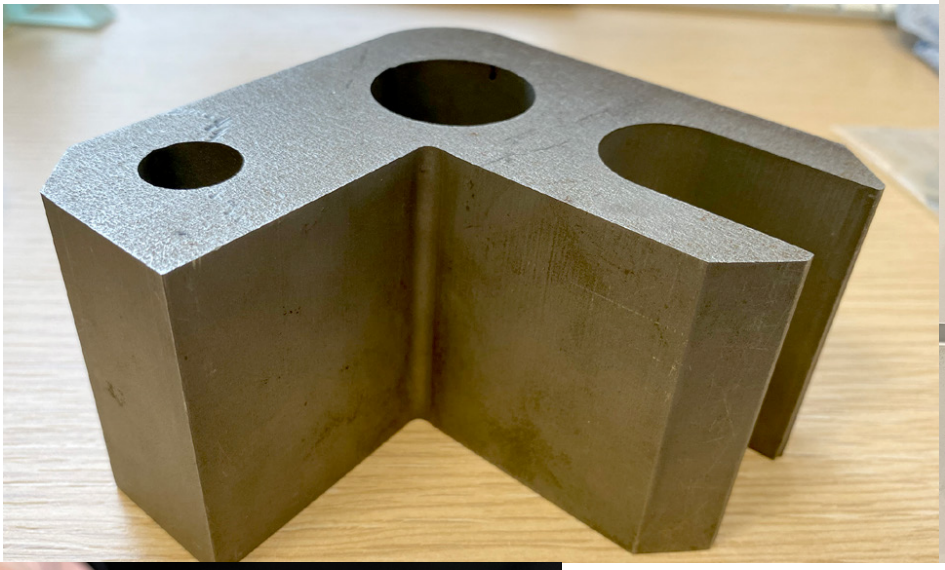
- I risultati del lavoro di modellazione delle prestazioni dell'orifizio (anche detto ugello primario)(Figura 3 e Figura 4) hanno portato alla definizione della geometria migliore per l'orifizio per diverse applicazioni (WJ puro, AWJ, microAWJ). Questa conoscenza dovrebbe essere inclusa nel sistema CAM per suggerire all'operatore quale configurazione dell'ugello usare in base al compito produttivo (Figura 1, blocco CAM).

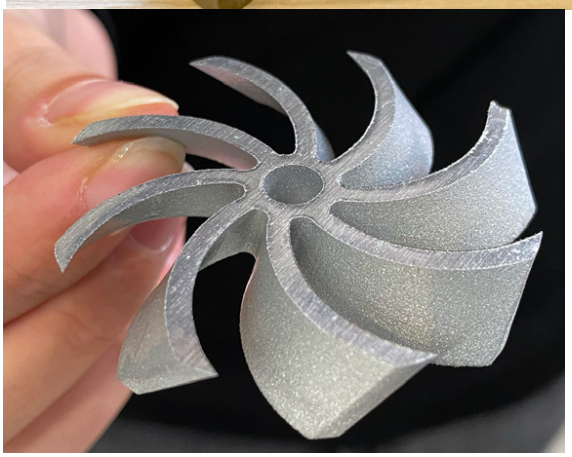
## Sensorizzazione

La sensorizzazione, il monitoraggio e il controllo sono importanti nei gemelli digitali poiché sono fondamentali per acquisire informazioni sul sistema reale durante le operazioni e poi prendere decisioni ed agire per correggere deviazioni, programmare la manutenzione o fermare le operazioni. Tra i sensori e sistemi di monitoraggio sviluppati, i più interessanti sono quelli non invasivi, come il trasduttore di potenza elettrica trifase della pompa, il tubo di focalizzazione strumentato mediante accelerometri MEMS e il sistema di monitoraggio a emissione acustica (1)(Figura 1, blocco di esecuzione).

Le considerazioni principali sulla sensorizzazione, il monitoraggio e il controllo sono descritti qui nel seguito:

- Il segnale di potenza elettrica consente di catturare eventuali squilibri tra i cilindri, perdite e altri malfunzionamenti della pompa senza modificare il circuito idraulico della pompa.
- L'articolo (1) dimostra come si possa estrarre un indice di capacità di taglio AWJ dal segnale di vibrazione del focalizzatore. Questa è un'opportunità interessante in quanto è generale, cioè non dipendente dal materiale lavorato, poiché non è necessario installare sensori sul materiale target, ed è anche non invasiva. Un sistema di monitoraggio che utilizza questo tipo di focalizzatore strumentato potrebbe rilevare deviazioni nella capacità di taglio e compensarle agendo sulla pressione dell'acqua e/o sulla portata di abrasivo, ad esempio aumentandoli per mantenere costante la capacità di taglio. L'articolo (1) spiega l'uso dello stesso focalizzatore strumentato per monitorarne l'usura. Questo potrebbe dare al gemello digitale la possibilità di essere consapevole dello stato del focalizzatore e decidere quando fermare le operazioni per sostituirlo.
- Un'evoluzione del sistema di monitoraggio delle vibrazioni del focalizzatore è il sistema di monitoraggio delle emissioni acustiche (1). Questo sistema è ancora meno invasivo in quanto basato su un microfono posizionato nell'area di lavoro.
- Il monitoraggio e il controllo della portata di abrasivo sono leve possibili per migliorare la precisione e il controllo del getto d'acqua, quindi è consigliabile installare un dosatore di abrasivo a ciclo chiuso sulla macchina, come quelli sviluppati e brevettati da WJ_Lab e i suoi partner (1), considerando anche i commenti precedenti sulla compensazione della qualità tramite il controllo della portata di abrasivo.
- La velocimetria laser Doppler è uno strumento importante per caratterizzare l'orifi-





Alcuni esempi di pezzi realizzati con la tecnologia Waterjet (da sinistra in alto: cortesia Flow Waterjet (acciaio, spessore 80 mm circa), cortesia F.lli Guazzoni s.r.l. (acciaio, spessore 400 mm circa), cortesia WJ_ Lab (alluminio))

zio e le prestazioni idrauliche complessive dell'impianto, ma non è pratico in un ambiente industriale, quindi non è incluso in una possibile soluzione di gemello digitale per il getto d'acqua.

- Considerazioni simili possono essere fatte per le misurazioni di forza di impatto del getto d'acqua, che sono più adatte per scopi di ricerca.

## Flusso di lavoro digitale

La Figura 1 è uno strumento importante per evidenziare le nuove funzioni che dovrebbero essere assegnate agli elementi del flusso di lavoro digitale del getto d'acqua:

- I sistemi CAM non dovrebbero solo occuparsi del percorso utensile e dei parametri di processo per tagliare un certo materiale con un certo spessore, ma dovrebbero suggerire la configurazione dell'ugello più adatta in base all'applicazione (materiale da lavorare, WJ puro o AWJ, alta precisione o precisione standard). Inoltre, il CAM dovrebbe pianificare il movimento della testa di taglio, inclusa la sua inclinazione per compensare l'inclinazione del taglio (taper) e il jet lag. Un sistema CAM più avanzato e futuristico potrebbe persino generare un part program che includa comandi da impartire all'alimentatore di abrasivo in funzione della posizione lungo il percorso utensile.
- Alcuni software CAD/CAM/simulazione capaci di simulare lavorazioni a getto d'acqua esistono già sul mercato. Questa funzione è inclusa nei pacchetti software offerti dai costruttori di macchine per il taglio a getto d'acqua o in software indipendenti come IGEMS, Vericut, Autodesk. I software attuali per il getto d'acqua possono svolgere operazioni come nesting, calcolo del tempo ciclo, valutazione dei costi ma, per quanto riguarda la simulazione del percorso utensile (e della macchina), non possono includere il comportamento del controllo numerico, il quale è importante per sviluppare il gemello digitale del getto d'acqua. Infatti, i controlli delle macchine waterjet sono spesso sviluppati internamente o adattati dai costruttori e i loro principi di funzionamento non vengono condivisi con gli sviluppatori di software di simulazione di terze parti. Una simulazione completa, che includa anche le funzioni macchina a basso livello, è importante nei gemelli digitali per sviluppare cicli di lavorazione realistici e corretti al primo tentativo. Inoltre, la simulazione dovrebbe essere usata nella fase di progettazione del ciclo di produzione per verificare la presenza di collisioni. A tal fine, i dispositivi di bloccaggio e i pezzi dovrebbero essere modellati, come già avviene nella fresatura. Un software di simulazione del futuro potrebbe persino simulare le forze sul pezzo e avvertire l'utente in caso di criticità (es. rottura del pezzo), con lo scopo di rientrare nel CAM per modificare la strategia di taglio. Un'altra nuova funzione di simulazione potrebbe essere la possibilità di simulare i segnali della pompa. Questa simulazione potrebbe essere ese-

guita offline prima della reale operazione di lavorazione per creare modelli nominali di segnali da confrontare con quelli reali durante l'operazione. Un dispositivo edge computing potrebbe svolgere questo compito. Ulteriori evoluzioni del software di simulazione potrebbero anche ricevere altri segnali dalla macchina, come quelli indicati nella Figura 1 nel blocco di esecuzione.

- L'esecuzione in macchina potrebbe includere le nuove funzioni evidenziate per chiudere un anello di controllo sullo stesso CNC della macchina, che dovrebbe occuparsi di compensare i valori di pressione e portata di abrasivo per mantenere costante la capacità di taglio. Il CNC potrebbe ricevere informazioni sullo stato di usura del focalizzatore e avvertire l'utente. Inoltre, potrebbe controllare finemente la portata di abrasivo in base al ciclo di lavorazione progettato dal CAM. Un ciclo di controllo più ampio potrebbe essere chiuso con il blocco di simulazione per considerare il comportamento della pompa e migliorare i modelli di simulazione della stessa. L'ultimo punto nel blocco di esecuzione della Figura 1 riguarda i nuovi sistemi di misura visiva del pezzo, che potrebbero essere installati sulla macchina per verificare la posizione dei pezzi prelavorati e registrare le operazioni di taglio a getto d'acqua in funzione delle feature esistenti (Figura 5). Questi sistemi esistono già per altri processi (es. EDM) e sono in fase di sviluppo presso il WJ_Lab per applicazioni nel getto d'acqua.
- Per creare una comunicazione adeguata tra i componenti del flusso di lavoro digitale del getto d'acqua, si dovrebbe sfruttare l'Industrial Internet of Things (IIoT). Questo fatto richiede investimenti e un approccio aperto dei costruttori di macchine verso l'innovazione.

WJ_Lab del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano e macchina Intermac Primus 322 Metal di cui è dotato il laboratorio

## Conclusioni

Questo articolo analizza il lavoro di ricerca condotto presso il WJ_Lab (laboratorio Waterjet del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano) negli ultimi 25 anni per evidenziare come le categorie di ricerca sul taglio waterjet convergano verso il concetto del gemello digitale del getto d'acqua (waterjet digital twin). Il termine digital twin è già usato in molti campi dell'ingegneria, dell'industria e anche in altri domini, e rappresenta bene l'ambizioso obiettivo del WJ_Lab, che consiste nell'utilizzare le conoscenze scientifiche sviluppate sul taglio a getto d'acqua per creare un modello completo da usare per scopi di progettazione, gestione, esecuzione e manutenzione. In passato, le singole categorie di ricerca sono state studiate perché di interesse scientifico e industriale di per sé, ma ora possono essere raccolte e sintetizzate sotto l'ombrello comune del gemello digitale. È un concetto potente che può spingere la ricerca e l'applicazione industriale del getto d'acqua ancora più avanti, lungo lo stesso percorso già tracciato da altri processi come la fresatura e l'EDM. Le catene di processo ibride che coinvolgono il getto d'acqua e altri processi saranno facilitate dallo sviluppo di un gemello digitale coerente. Il waterjet digital twin e il taglio waterjet di precisione (anche detto microAWJ) convergeranno verso un unico sistema a getto d'acqua digitale, ad alta precisione e alta produttività, capace di adattarsi a requisiti diversi. L'intelligenza artificiale sarà quindi applicata al campo industriale del getto d'acqua, una volta abilitata dall'evoluzione digitale del processo. Il cammino è ancora lungo poiché richiede un'adeguata mentalità e conseguenti investimenti da parte degli attori del settore del getto d'acqua, come i ricercatori, all'avanguardia dell'evoluzione, ma anche i costruttori di macchine, sviluppatori di software, fornitori di servizi e persino gli utenti. Di certo, questo cammino vale la pena di essere seguito.■

**Riferimenti bibliografici**

Annoni, M. A Review of Waterjet Cutting Research towards microAWJ and the Definition of the Waterjet Digital Twin. Materials 2024, 17, 1328. https://doi.org/10.3390/ma17061328