



Università Politecnica delle Marche
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria
Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale

Tecniche e materiali innovativi per una produzione efficiente ed ecosostenibile

Ph.D. Dissertation of:

Alessio D'Orazio

Advisor:

Prof. Archimede Forcellese

Ph.D. Course coordinator:

Prof. Ferruccio Mandorli

XVI edition - new series



Università Politecnica delle Marche
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria
Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale

Tecniche e materiali innovativi per una produzione efficiente ed ecosostenibile

Ph.D. Dissertation of:

Alessio D'Orazio

Advisor:

Prof. Archimede Forcellese

Ph.D. Course coordinator:

Prof. Ferruccio Mandorli

XVI edition - new series

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
SCUOLA DI DOTTORATO IN SCIENZE DELL'INGEGNERIA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Via Brezze Bianche - 60131 - Ancona, Italy

Ringraziamenti

Dopo quasi quattro anni finisce qui un importante percorso della mia vita. In questo periodo ho avuto modo di conoscere molte persone e ciascuna di loro, nel bene e nel male, mi ha insegnato qualcosa, aiutandomi a crescere sia professionalmente che personalmente.

Rivolgo un primo e doveroso ringraziamento al *Prof. Archimede Forcellese* per avermi dato la possibilità di intraprendere questa strada e per avermi spronato, supportato e criticato costruttivamente durante questi anni.

Desidero inoltre ringraziare tutti i membri del *gruppo di Tecnologie e sistemi di lavorazione* che hanno contribuito a creare un ambiente di amicizia, collaborazione e grande professionalità.

Un ringraziamento particolare va al *Sig. Marco Zannini* e al *Sig. Stefano Zannini*, per avermi dato la possibilità di svolgere questa attività, e all'*Ing. Saverio Zitti* per la sua serietà e per avermi aiutato ad ampliare le mie capacità.

Ringrazio, inoltre, tutti coloro che fanno parte della *Zannini SpA* per la disponibilità e competenza dimostrata.

In ultimo, non per importanza, ringrazio la mia famiglia per il sostegno e l'incoraggiamento costante durante questi anni.

Sommario

La competitività delle aziende dipende dalla capacità di innovare prodotti e processi, tenendo in conto la gestione sostenibile delle risorse e la riduzione di impatti ambientali e sociali per il miglioramento della qualità della vita. Ciò implica un profondo cambiamento verso sistemi di produzione e di consumo più sostenibili accompagnato da un cambiamento culturale e di stili di vita, ovvero una transizione verso una green economy. L'eco-innovazione è il principale strumento della green economy e, dunque, dello sviluppo sostenibile. In particolare, grazie all'introduzione di una o più tecnologie ecoinnovative, le aziende possono conseguire una riduzione degli impatti ambientali osservabile lungo tutto il ciclo di vita dei propri prodotti e/o processi.

L'eco-innovazione riguarda lo sviluppo di tecnologie di produzione più sostenibili ma anche l'utilizzo di materiali leggeri ed ecoinnovativi, soprattutto nel settore dell'automotive e in quello aeronautico, dove è più significativa la riduzione delle emissioni di CO₂ connesse ad un risparmio del consumo di carburante.

Alla luce di tutto ciò, lo scopo del presente lavoro di tesi è quello di investigare da più prospettive il concetto di sostenibilità ambientale nei processi manifatturieri.

Abstract

Nowadays, companies' competitiveness depends on their ability to innovate products and processes, keeping in mind that a better quality of life is given by the sustainable management of resources and a lower impact on society and the environment. This involves a deep change towards more sustainable production and consumption systems along with a change in culture and life style, i.e. a transition towards a green economy. Eco-innovation is the main instrument of green economy and, consequently, of sustainable development.

In particular, thanks to the introduction of an environmentally friendly system, companies can achieve a reduction of their carbon footprint that can be observed along the entire life cycle of their products or processes.

The eco-innovation can consist in the development of manufacturing technologies more sustainable as well as in the development of new Eco-friendly and lightweight materials, especially in the automotive and aeronautical sectors, where the environmental benefit is greater with the reduction of carbon emission, coupled with the savings in fuel.

In light of this, the overall purpose of the work developed in this thesis is to analyze the environmental sustainability concept in the manufacturing processes through a Multiple-Perspective Approach.

Indice

1 Introduzione	1
1.1 Il concetto di sviluppo sostenibile.....	3
1.1.1 Nuovi percorsi della sostenibilità: processi ecoefficienti, Demufacturing e materiali ecoinnovativi	5
1.1.1.1 Eco-efficienza.....	5
1.1.1.2 Demufacturing	6
1.1.1.3 Materiali ecoinnovativi.....	8
1.3 Gli indicatori di sostenibilità	10
1.4 Struttura della Tesi	12
2 Friction Stir Welding (FSW)	14
2.1 Premessa	14
2.2 Applicazione della metodologia LCA (Life Cycle Assessment) per la valutazione dell’impatto ambientale.....	16
2.2.1 Obiettivo dello studio	16
2.2.2 Procedure sperimentali	17
2.2.3 Metodologia LCA (Life Cycle Assessment)	19
2.2.4 Risultati sperimentali e discussione	22
2.2.4.1 Influenza dei parametri di processo sull’impatto ambientale	22
2.2.4.2 Correlazione tra impatto ambientale e proprietà meccaniche dei giunti	31
2.3 Previsione della forza verticale con reti neurali artificiali	35
2.3.1 Obiettivo dello studio	35
2.3.2 Procedure sperimentali	39
2.3.3 Reti neurali artificiali (ANN)	42
2.3.4 Risultati sperimentali e discussione	46
3 Lavorazioni meccaniche Ecocompatibili	54
3.1 Premessa	54
3.2 Procedure sperimentali	59
3.2.1 Stampaggio a freddo.....	60

3.2.2 Prove di tornitura.....	62
3.3 Risultati sperimentali e discussione	67
4 Materiali ecoinnovativi: Analisi del processo di Foratura di stacks ibridi CFRP/Alluminio.....	71
4.1 Premessa.....	71
4.2 Procedure sperimentali	74
4.3 Risultati sperimentali e discussione	79
Conclusioni.....	86
Bibliografia.....	90

Lista delle figure

Figura 1.1: Quote del consumo globale finale di energia ed emissioni di CO ₂ per settore, 2005.....	2
Figura 1.2: Consumo di energia nel 2009 in Italia e Germania.....	3
Figura 1.3: Le interconnessioni tra le dimensioni dello sviluppo sostenibile.....	5
Figura 1.4: Resistenza specifica-Rigidezza specifica per diversi materiali.....	9
Figura 1.5: Ciclo di vita di un prodotto in acciaio.....	10
Figura 1.6: La struttura della LCA proposta dalla ISO 14040.....	12
Figura 2.1: Processo di FSW.....	15
Figura 2.2: a) Particolare del processo di saldatura FSW al CNC e b) utensile per le prove di FSW.....	17
Figura 2.3: Macchina di prova servoidraulica MTS 810 System.....	18
Figura 2.4: Schema Impact 2002+.....	21
Figura 2.5: Effetto dei parametri di processo sul consumo di energia durante il processo di FSW.....	23
Figura 2.6: Effetto dei parametri di processo sui midpoint.....	27
Figura 2.7: Effetto dei parametri di processo sugli endpoint.....	29
Figura 2.8: Indice di impatto ambientale per le diverse condizioni di processo investigate.....	30
Figura 2.9: Provini saldati con FSW prima e dopo prova di trazione.....	31
Figura 2.10: Risultati prove di trazione.....	32
Figura 2.11: Effetto dei parametri di processo su (a) EII _{UTS} e (b) EII _{UE}	34
Figura 2.12: Schematizzazione Movimento Pin con Perdita di Affondamento.....	37
Figura 2.13: Le due aliquote che provocano la perdita di affondamento dell'utensile.....	38
Figura 2.14: Caratteristiche tecniche ed operative cella di carico Kistler 9041A.....	40
Figura 2.15: (a) configurazione celle di carico su piastra dinamometrica e (b) montaggio sul centro di lavoro.....	41
Figura 2.16: Architettura rete neurale.....	44
Figura 2.17: Fasi principali processo FSW.....	46

Figura 2.18: (a) Confronto tra le curve sperimentali e quelle previste dalla rete al variare di v ($\omega= 1200$ rpm) e (b) errore relativo	48
Figura 2.19: (a) Confronto tra le curve F-t sperimentali e quelle previste dalla rete al variare di v ($\omega= 1500$ rpm) e (b) errore relativo	48
Figura 2.20: (a) Confronto tra le curve F-t sperimentali e quelle previste dalla rete al variare di v ($\omega= 2500$ rpm) e (b) errore relativo	49
Figura 2.21: Grafico del coefficiente di correlazione	50
Figura 2.22: (a) Confronto tra le curve F-t sperimentali e quelle previste dalla rete, (b) errore relativo e (c) coefficiente di relazione per la condizione ($\omega= 1350$ rpm, $v= 80$ mm/min).....	51
Figura 2.23: (a) Confronto tra le curve F-t sperimentali e quelle previste dalla rete, (b) errore relativo e (c) coefficiente di relazione per la condizione ($\omega= 1700$ rpm, $v= 45$ mm/min).....	52
Figura 3.1: Boccia oggetto dello studio: (a) applicazione e (b) dimensioni	59
Figura 3.2: Processo di DCE	61
Figura 3.3: Attrezzatura utilizzata per processo di DCE	61
Figura 3.4: Forma componente stampato a freddo	62
Figura 3.5: Tornio INDEX ABC utilizzato per le prove di tornitura	63
Figura 3.6: Inserto utilizzato.....	63
Figura 3.7: (a) Tondo pieno e (b) componente sbizzato utilizzati per la sperimentazione	64
Figura 3.8: Rugosimetro Mitutoyo modello SV-3000.....	66
Figura 3.9: Rotondimetro Mitutoyo modello RA-2200.....	67
Figura 3.10: Andamento di VB in funzione del tempo di lavorazione.....	68
Figura 3.11: Andamento di Ra in funzione del tempo di lavorazione.....	69
Figura 3.12: Andamento della cilindricità in funzione del tempo di lavorazione	69
Figura 3.13: Quantità di truciolo prodotta nei due casi	70
Figura 4.1: Stack utilizzato per le prove di foratura	75
Figura 4.2: Schema di foratura e zona in cui è stata misurata la forza verticale	76
Figura 4.3: Assieme piastra dinamometrica-stack.....	77
Figura 4.4: Quantificazione della delaminazione	78
Figura 4.5: Sistema con tastatore a contatto della macchina CMM per la misura del diametro dei fori.....	79

Figura 4.6: Quantificazione del labbro di usura	80
Figura 4.7: Andamento del VB in funzione del numero di fori.....	80
Figura 4.8: Andamento della Forza in funzione del tempo di foratura per il primo e l'ultimo foro per la punta (a) rivestita DLC e (b) in TiAlN	81
Figura 4.9: Evoluzione della forza con il numero di fori realizzati.....	82
Figura 4.10: Andamento del DF con il numero di fori	83
Figura 4.11: Evoluzione del diametro dei fori per la punta (a) rivestita DLC e (b) in TiAlN	83
Figura 4.12: Correlazione del VB con (a) forza assiale, (b) fattore di delaminazione e (c) diametro dei fori.....	84

Lista delle tabelle

Tabella 2.1: Energia assorbita durante il processo di FSW	22
Tabella 2.2: Caratterizzazione midpoint.....	24
Tabella 2.3: Normalizzazione midpoint	26
Tabella 2.4: Caratterizzazione endpoint	27
Tabella 2.5: Normalizzazione endpoint.....	28
Tabella 2.6: Risultati prove di trazione.....	32
Tabella 2.7: Condizioni di processo utilizzate per costruire il training set.....	42
Tabella 2.8 : Condizioni utilizzate per la fase di testing.....	42
Tabella 2.9: Parametri utilizzati per la fase di training.....	44
Tabella 2.10: Valori dell'errore percentuale assoluto medio nella previsione delle curve F-T nelle diverse condizioni di processo investigate	49
Tabella 3.1 Composizione percentuale acciaio C15.....	60
Tabella 3.2: Procedura per quantificare il VB secondo la norma ISO 3685:1993	65
Tabella 4.1: Caratteristiche geometriche delle due punte utilizzate per gli esperimenti.....	75
Tabella 4.2: Parametri di taglio utilizzati per gli esperimenti.....	76

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni le problematiche connesse con il risparmio energetico hanno assunto un'importanza rilevante per tutta una serie di caratteri socio-economici che hanno spinto le società industrializzate a rapportarsi in termini più ragionati nei riguardi delle fonti di energia (costi crescenti dell'energia, inquinamento ambientale, innalzamento tendenziale della temperatura del pianeta, ecc.).

Tutto ciò non poteva non coinvolgere i processi produttivi connessi con l'industria manifatturiera che si è posta l'obiettivo dell'innovazione tecnologica di processo e di prodotto per cercare di migliorare le prestazioni ambientali attraverso l'uso efficiente delle risorse e la riduzione dei rifiuti.

Nonostante i molti progressi compiuti dall'industria nel migliorare le prestazioni ambientali, i benefici in molti casi sono stati annullati dai crescenti volumi di produzione e consumo. Risulta inoltre sempre più evidente che la sfida principale

Capitolo 1 *Introduzione*

per il futuro è ridurre l'uso delle risorse naturali nella progettazione, produzione ed utilizzo di prodotti e materiali. I problemi ambientali oggi più importanti sono infatti legati all'uso delle risorse e dell'energia [1,2]. La produzione rimane un settore che globalmente consuma la maggiore quantità di energia, con una quota del 33% riguardando all'incirca il 38% delle emissioni totali di CO₂ [3]. A seguire si possono trovare le famiglie (29%) e il trasporto (26%), come si può notare dalla figura 1.1.

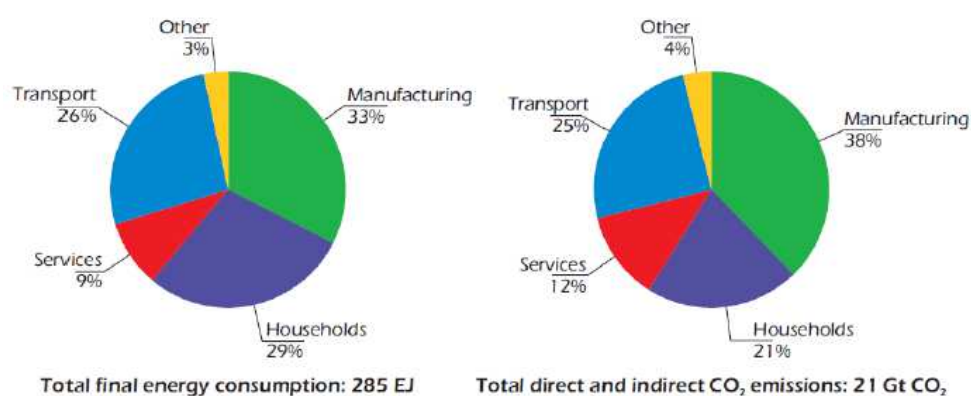


Figura 1.1: Quote del consumo globale finale di energia ed emissioni di CO₂ per settore, 2005

Il trend dell'uso di energia naturalmente varia significativamente se si considerano diversi paesi e diverse regioni. Ad esempio in Italia il settore manifatturiero è responsabile del 28% del consumo di energia primaria, risultando così il settore più inquinante dietro il domestico. Invece in Germania l'industria è quella che ha un consumo maggiore, come si può vedere dal confronto mostrato in figura 1.2.

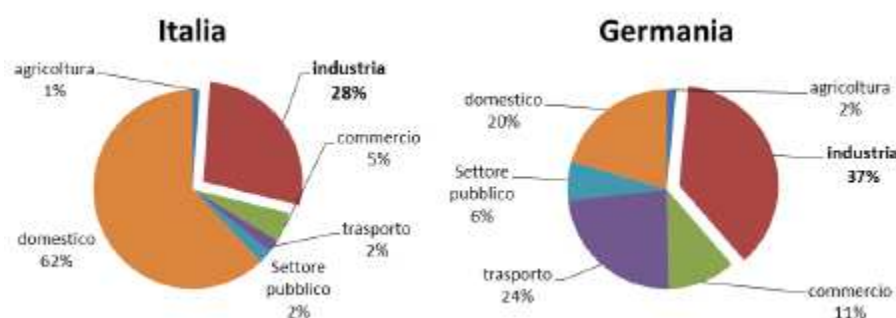


Figura 1.2: Consumo di energia nel 2009 in Italia e Germania

Come già detto in precedenza, negli ultimi decenni l'efficienza energetica industriale è migliorata e l'intensità di CO₂ emessa è diminuita in molti settori. Tuttavia, questo progresso è stato più che compensato in negativo da una crescita della produzione industriale mondiale. Le emissioni dirette per conto dell'industria manifatturiera, attualmente, incidono per il 20%. Per ridurre drasticamente queste emissioni sarà importante, quindi, nei prossimi anni la ricerca e lo sviluppo di tecnologie di produzione più sostenibili.

1.1 Il concetto di sviluppo sostenibile

Come si è visto nel paragrafo precedente, a causa delle crescenti sfide legate al cambiamento climatico e alla carenza delle risorse di combustibile fossile, c'è la necessità di introdurre pratiche di produzione più sostenibili che consentono un utilizzo più efficiente delle risorse naturali e riducono gli impatti negativi sull'ambiente.

La definizione più emblematica, diffusa e condivisa in letteratura di **sviluppo sostenibile** è quella enunciata dalla W.C.E.D. nel Rapporto Brundtland del 1987: *“L'umanità ha la possibilità di rendere sostenibile lo sviluppo, cioè di far sì che*

Capitolo 1 *Introduzione*

esso soddisfi i bisogni delle generazioni presenti, senza compromettere la possibilità di soddisfacimento dei bisogni di quelle future” [4].

In questa definizione, chiaramente, non si parla solamente di tutela dell’ambiente; nonostante, infatti, il concetto di sostenibilità venga spesso associato all’ecologia ed alla green economy, con sviluppo sostenibile ci si riferisce, in generale, ad una crescita che prenda in considerazione il benessere degli individui a tutto tondo, compresa la tutela dei principi etici e sociali, il rispetto delle tradizioni e delle comunità. In sostanza, si tratta di una crescita equilibrata, sia delle imprese che di tutte le organizzazioni, le istituzioni e gli enti che con le loro attività interagiscono con l’ambiente circostante e con i vari stakeholders del caso.

In tale ottica, la sostenibilità è da intendersi non come uno stato o una visione immutabile, ma piuttosto come un processo continuo, che necessita di declinarsi su tre dimensioni fondamentali (“*the triple bottom line*” termine coniato per la prima volta da J. Elkington nel 1994) tra di loro concatenate [5,6] (Figura 1.3):

- **sostenibilità ambientale:** capacità di mantenere nel tempo qualità e riproducibilità delle risorse naturali, di preservare la diversità biologica e di garantire l’integrità degli ecosistemi;
- **sostenibilità economica:** capacità delle organizzazioni di generare reddito in maniera continuativa e allo stesso tempo di fornire un posto di lavoro e maggiore welfare alla comunità in cui sono inserite.
- **sostenibilità sociale:** capacità di garantire alle generazioni attuali e a quelle future eque condizioni di benessere (divertimento, serenità, socialità) e l’accesso a beni considerati fondamentali (sicurezza, salute, istruzione).



Figura 1.3: Le interconnessioni tra le dimensioni dello sviluppo sostenibile

1.1.1 Nuovi percorsi della sostenibilità: processi ecoefficienti, Demanufacturing e materiali ecoinnovativi

1.1.1.1 Eco-efficienza

Secondo il WBCSD (*World Business Council for Sustainable Development*) sono sette le dimensioni dell'eco-efficienza che un'impresa deve prendere in considerazione durante tutte le sue funzioni [7]: dal marketing allo sviluppo del prodotto, dalla produzione alla distribuzione dello stesso:

- Ridurre l'intensità delle materie utilizzate;
- Ridurre l'intensità dell'energia utilizzata;
- Ridurre la dispersione di sostanze tossiche;
- Massimizzare l'uso di risorse rinnovabili,
- Favorire la riciclabilità dei materiali,
- Aumentare la durata del prodotto,
- Aumentare l'intensità dei servizi (correlati ai prodotti e ai processi).

Ciò implica obiettivi come:

- minimizzare l'uso di energia, acqua, suolo, favorendo la riciclabilità e la durata del prodotto con una particolare attenzione agli imballaggi;
- minimizzare le emissioni, gli scarichi, la dispersione di sostanze tossiche e promuovere l'uso di risorse rinnovabili;
- implementare gli SGA (Sistemi di Gestione Ambientale) da integrare con l'esistente Sistema di Management Economico per costruire "l'approccio eco-efficiente".
- fornire ai consumatori i benefici di funzionalità, flessibilità e modularità del prodotto, con servizi aggiuntivi e focalizzando l'attenzione sulla vendita dei prodotti di cui i clienti effettivamente necessitano;

1.1.1.2 Demanufacturing

Il Demanufacturing può essere definito come la separazione dei singoli componenti che costituiscono un prodotto con l'obiettivo di riutilizzarli, rilavorare per recuperarne le funzioni e caratteristiche o, eventualmente, riciclarli per recuperare materiali nel caso le prime due opzioni non sono applicabili [8]. Pertanto, un sistema di Demanufacturing include un insieme di tecnologie, strumenti e metodi knowledge-based che consentono di ottimizzare il valore residuo dei rifiuti industriali e prodotti high-tech a fine vita, nell'ottica della "circular economy"[9-12].

Il Demanufacturing è un processo molto semplice, che permette di recuperare un grande quantitativo di materia prima se viene correttamente eseguito.

Ad esempio, in un solo frigorifero possono essere recuperati 28 chilogrammi di ferro, tre di alluminio e del prezioso rame in circa 40 chili complessivi di materia prima. Quindi, il quantitativo di materiale recuperabile in un elettrodomestico spiega la potenzialità e l'importanza di questo processo.

Per questo motivo, molte grandi aziende si stanno già attivamente adoperando su questo tema. Un esempio è il primo impianto pilota automatizzato realizzato dall'Istituto di Tecnologie Industriali e Automazione (ITIA) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) di Milano in collaborazione con Candy e Magneti Marelli. Al fine di rendere il più efficiente possibile il processo di Demanufacturing sui prodotti a fine vita, è importante considerare nella fase preliminare di progettazione la migliore soluzione in termini di impatto ambientale, costi, qualità, ecc. [13,14]. A tal proposito, ci sono diversi approcci di tipo pratico/teorico, che forniscono molteplici spunti sia per quanto riguarda delle linee guida progettuali, sia per specifiche soluzioni tecniche. A tal proposito, abbiamo:

- **Design for disassembly:** consiste nel considerare le operazioni di disassemblaggio cui il prodotto sarà sottoposto nel suo ciclo di vita e nell'ottimizzarle prima che inizi la fase produttiva. L'obiettivo principale è dunque la progettazione di un disassemblaggio efficiente ed economico, tale da consentire la riciclabilità ed il riuso di un prodotto, o tale da incrementarne la manutenibilità. Considerare tali aspetti in questa fase iniziale di progetto significa poter analizzare la semplicità di smontaggio e migliorarlo per poi rendere tale operazione concretamente attuabile. Un'operazione di smontaggio si presenta infatti non solo a fine vita del prodotto, ma anche tutte le volte che si rende necessaria una manutenzione: è quindi strettamente legata all'efficienza, all'affidabilità ed alla manutenibilità del prodotto. Ottimizzare il processo di smontaggio porta a numerosi vantaggi, in quanto offre la possibilità di ridurre i tempi richiesti, di abbassare il costo delle operazioni, di diminuire il bisogno energetico annesso e di automatizzare il processo.
- **Design for Recycling:** insieme di strategie che tendono ad ottimizzare la riciclabilità di un determinato prodotto. Diventa fondamentale la scelta e

la valutazione dei materiali nel ciclo di vita, la loro separabilità, il loro grado di purezza, la facilità di rimozione.

- **Design for Remanufacturing:** consiste in una serie di strategie finalizzate al riuso e alla reimmissione di determinati componenti nella catena produttiva. Queste influiscono sui processi di montaggio e manutenzione.

Tali approcci, sviluppati per realizzare l'eco-design, a loro volta rientrano sotto quello che viene chiamato *Design for Environment* (DfE).

1.1.1.3 Materiali ecoinnovativi

Nella moderna realtà industriale si è sempre alla ricerca di materiali che consentano di ottenere componenti dalle prestazioni più elevate.

In particolare nel settore aeronautico, così come in quello dell'automotive, l'esigenza di ridurre i pesi è sempre più sentita.

Tale necessità deriva da problematiche legate al crescente inquinamento ambientale, in quanto esiste una stretta correlazione tra consumo di carburante e peso. La progettazione, dunque, mira a ridurre al minimo il peso dei componenti senza interferire sulla funzionalità, sulla sicurezza e sulla vita in esercizio. Risulta dunque di estremo interesse industriale l'impiego di leghe leggere, quali le leghe di alluminio e di magnesio.

Questa continua esigenza di alleggerimento strutturale sta sviluppando anche un crescente interesse verso i materiali compositi [15-17].

In particolare, come si può vedere dalla figura 1.4, essi sono ideali nelle applicazioni in cui sono richiesti elevati rapporti resistenza-peso (*resistenza specifica*) e rigidità-peso (*modulo specifico*).

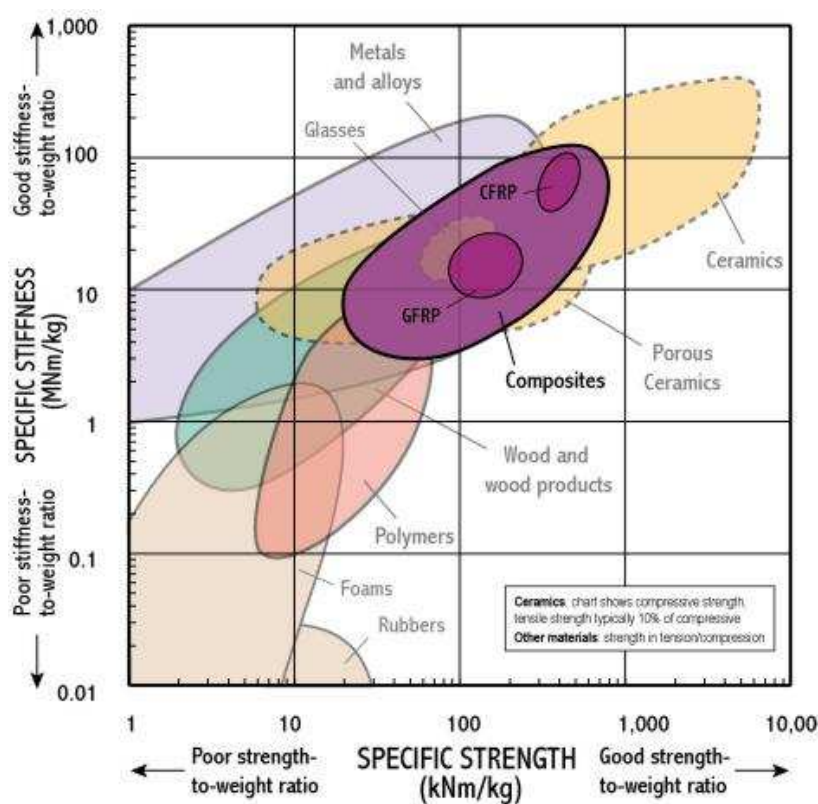


Figura 1.4: Resistenza specifica-Rigidezza specifica per diversi materiali

Tuttavia, il motivo per cui i compositi stanno evolvendosi sempre di più, è soprattutto per i vantaggi che offrono sotto il profilo ambientale:

1. Molti studi hanno visto che i materiali compositi sono in grado di sostituire efficacemente acciaio e leghe leggere nei componenti strutturali destinati ai veicoli. Questo significa che nei prossimi anni si potranno avere auto con riduzioni di peso fino al 40% rispetto a quelle attuali. Tutto ciò è di notevole importanza, se si considera il fatto che l'unione europea ha delineato un piano che porterà entro il 2050 alla riduzione delle emissioni di CO₂ del 60%;
2. L'utilizzo di compositi avvantaggia il riciclo dei componenti quando le autovetture sono a fine vita. In particolare l'utilizzo di matrici

termoplastiche e di fibre naturali hanno bassi impianti ambientali, e possono essere riutilizzate o stoccate senza inquinare;

3. L'avvento delle auto elettriche richiede anch'esso un risparmio in termini di peso, non essendo ancora proponibili potenze paragonabili a quelle dei motori a combustione interna.

1.3 Gli indicatori di sostenibilità

Nel contesto dello “sviluppo sostenibile” per il quale devono essere integrate assieme le sfere di sviluppo economico, sociale e ambientale nasce l’innovativa filosofia di pensiero denominata “*Life Cycle Thinking*” (LCT).

Tale idea implica una valutazione dell’intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l’estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l’uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale (figura 1.5).



Figura 1.5: Ciclo di vita di un prodotto in acciaio

Capitolo 1 *Introduzione*

Pertanto, l'approccio di valutazione degli impatti relativo al ciclo di vita (LCT) cerca di identificare i miglioramenti che è possibile apportare ad un prodotto e/o un processo, sotto forma di minore impatto ambientale e la riduzione delle risorse tra tutte le fasi del ciclo di vita, analizzando complessivamente le relazioni tra sistema tecnologico e ambiente dalla culla alla tomba. Prima di essere conosciuta e applicata attraverso lo strumento metodologico del Life Cycle Assessment (LCA), la metodologia ha preso diversi nomi tra cui “*Cradle to Grave analysis*”, “*Life cycle Analysis*”, “*Ecobalance*”, “*Energy and Environmental Analysis*” ect. [18].

LCA è una metodologia standardizzata (ISO 14040 - 14044) e può essere definita come un “*procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale*” [19].

Secondo le norme ISO della serie 14040 [20,21] uno studio LCA si compone delle seguenti fasi:

1. definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione (*Goal and scope definition*);
2. analisi dell'inventario (*Life Cycle Inventory- LCI*);
3. valutazione degli impatti (*Life Cycle Impact Assessment- LCIA*);
4. interpretazione del ciclo di vita (*Life Cycle Interpretation*).

Una rappresentazione schematica delle suddette quattro fasi dello studio LCA è riportata in Figura 1.6:

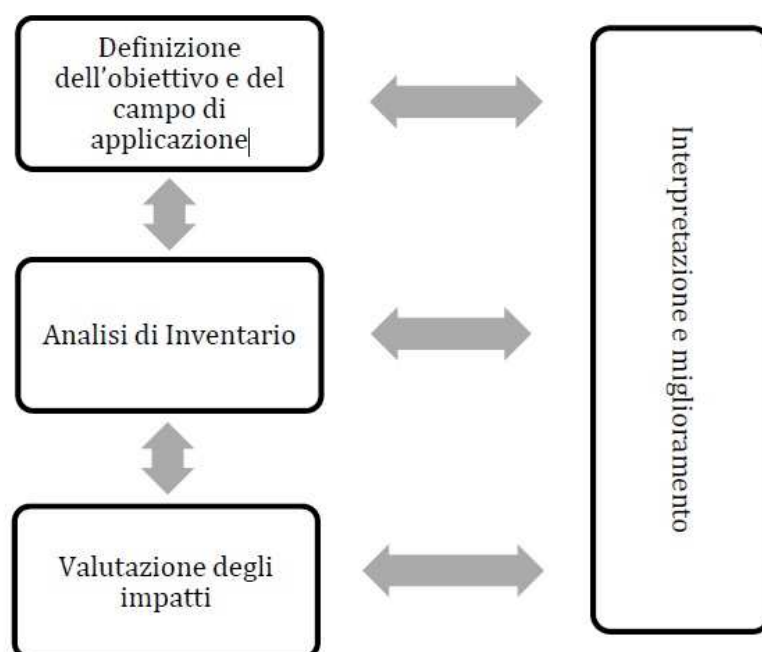


Figura 1.6: La struttura della LCA proposta dalla ISO 14040

1.4 Struttura della Tesi

La presente tesi è strutturata in diversi macro argomenti suddivisi per capitoli e aventi come denominatore comune il tema dell'**ecosostenibilità**.

A tal proposito, è stata approfondita principalmente la sostenibilità ambientale, andando ad enfatizzare come essa sia fonte di innovazioni, sia di prodotto che di processo.

Il capitolo 2 ed il capitolo 3 affrontano il tema dell'eco-efficienza ed eco-compatibilità nei processi di lavorazione. Nello specifico, il capitolo 2 è incentrato sullo studio del processo innovativo di Friction Stir Welding (FSW) su leghe leggere, che viene considerato per le sue numerose caratteristiche, che mettono in luce l'elevato grado di compatibilità ambientale, una tecnologia

Capitolo 1 *Introduzione*

green. In particolare è stata condotta un'analisi LCA (*Life Cycle Assessment*) su tale processo per valutarne l'impatto ambientale.

Per rendere tale tecnologia ancora più *green*, è stato inoltre costruito un modello basato sulle reti neurali artificiali (ANN) capace di modellizzare e di prevedere l'andamento della forza verticale che ha un impatto sulle proprietà meccaniche e sul consumo energetico.

Il capitolo 3, invece, è dedicato alle lavorazioni per asportazione di truciolo senza fluido lubrorefrigerante di componenti in acciaio, destinati al settore automotive, che hanno subito una lavorazione preliminare di stampaggio a freddo.

In particolare, tale studio è nato dalla stretta collaborazione con il Gruppo Zannini S.p.A. di Castelfidardo (AN), che come lo scenario industriale in generale, sta fronteggiando negli ultimi anni la sfida di rendere il processo produttivo un sistema economicamente efficiente e al contempo sostenibile, che nello specifico significa abbattere l'impatto ambientale, minimizzare il consumo energetico e limitare il consumo di risorse primarie.

Mentre, per quanto riguarda i materiali ecoinnovativi, il capitolo 4 ha come oggetto l'analisi del processo di foratura di stack ibridi formati da leghe di alluminio e materiali compositi rinforzati con fibre di carbonio (CFRP).

All'interno di ciascun capitolo vengono riportati i risultati ottenuti dalle diverse attività condotte, corredati con osservazioni conclusive.

Il presente lavoro è, quindi, chiuso da una sezione bibliografica in cui sono riportati tutti gli articoli e i testi consultati per la stesura del presente lavoro di tesi.

Capitolo 2

Friction Stir Welding (FSW)

2.1 Premessa

Il Friction Stir Welding è una tecnica recente di saldatura inventata dal TWI (The Welding Institute) a Cambridge (UK) nel dicembre del 1991 [22], ed è oggi utilizzata con successo in numerosi settori industriali come quello dell'automotive, navale e aerospaziale. Il FSW consiste nella saldatura allo stato solido di particolari metallici, in cui la giunzione avviene tramite il riscaldamento per attrito ed il rimescolamento del materiale ad opera di un utensile cilindrico, composto da una spalla (shoulder) e da una punta (pin), opportunamente sagomato. Quest'ultimo viene posizionato all'altezza della linea di giunzione dei componenti, che devono essere rigidamente accostati, quindi posto in rotazione e fatto traslare lungo la linea di giunzione, come mostrato in Figura 2.1.

Capitolo 2 *Friction Stir Welding*

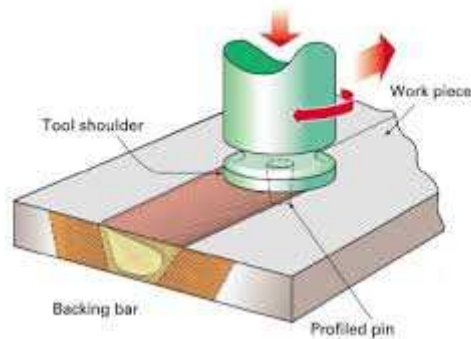


Figura 2.1: Processo di FSW

Il calore sviluppato determina una riduzione del carico di snervamento del materiale che viene portato localmente allo stato plastico, rendendolo duttile e più facilmente modellabile. La saldatura per attrito, se confrontata con i processi tradizionali di saldatura, comporta un minor consumo di energia, un minor scarto di materiale e la totale assenza di radiazioni e fumi pericolosi per la salute [23,24], per questi motivi viene definita una *green technology*. Inoltre consente di saldare leghe metalliche leggere, come quelle di Al e di Mg, che non potrebbero essere saldate attraverso le tecniche convenzionali [25].

Per la FSW due parametri sono molto importanti, la velocità di rotazione (ω , rpm) dell'utensile e la sua velocità di avanzamento (v , mm/min) lungo la linea di giunzione della saldatura.

Una più elevata velocità di rotazione dell'utensile, a parità di velocità di avanzamento, comporta un incremento di temperatura a causa del maggior attrito e quindi un più intenso mescolamento del materiale.

In aggiunta alla velocità di rotazione dell'utensile e alla velocità di avanzamento, un altro parametro fondamentale, in quanto determina la riuscita e la qualità della saldatura [26], è rappresentato dall'affondamento dell'utensile all'interno del materiale da saldare. Quest'ultimo influenza direttamente il calore generato

durante il processo e di conseguenza anche la forza verticale e longitudinale che il tool esercita sulle piastre.

Quando la profondità di penetrazione è insufficiente, lo *shoulder* dell'utensile non è a contatto con l'originale superficie del pezzo in lavorazione.

Di conseguenza, la rotazione dello *shoulder* non può muovere il materiale mescolato in modo efficiente dalla parte anteriore a quella posteriore del pin, comportando una saldatura con una scanalatura interna o con una superficie scanalata. Quando la profondità di penetrazione invece è eccessiva, lo *shoulder* affonda notevolmente nel pezzo in lavorazione, generando nel cordone di saldatura un eccessivo bordo laterale. In questo caso, viene prodotta una saldatura sensibilmente concava, che porta ad un locale assottigliamento del giunto saldato.

2.2 Applicazione della metodologia LCA (*Life Cycle Assessment*) per la valutazione dell'impatto ambientale

2.2.1 Obiettivo dello studio

Lo scopo dello studio è quello di valutare le performance ambientali di un processo innovativo di saldatura allo stato solido, ossia il Friction Stir Welding), su lamiere in lega di alluminio AA5754 al variare dei parametri di processo (v ed ω), con l'obiettivo di rendere tale tecnologia ancora più *green*. Inoltre, si è voluta stabilire una correlazione tra le proprietà meccaniche dei giunti e l'impatto ambientale.

La maggior parte degli studi disponibili in letteratura sul FSW si occupano dell'influenza dei parametri di processo e della geometria dell'utensile sulla

microstruttura e sulle proprietà meccaniche dei giunti saldati [27-32]. Mentre, nonostante venga considerata una tecnologia *green*, sono disponibili poche informazioni sul reale impatto ambientale di tale processo.

2.2.2 Procedure sperimentali

La saldatura FSW delle lamiere in lega di alluminio AA5754 è stata eseguita su un centro di lavoro a controllo numerico computerizzato (CNC) (Figura 2.2a) utilizzando un utensile in acciaio H13 (HRC = 52), caratterizzato da un pin a profilo troncoconico con diametro di base pari a 3,5 mm a ridosso dello shoulder, un angolo di 30° e altezza di 1,8 mm (Figura 2.2b).

Le lamiere usate per realizzare i giunti saldati misuravano 185 mm in lunghezza, 80 mm in larghezza e 2 mm in spessore.

Le prove sperimentali sono state condotte alla velocità costanti di rotazione (ω) pari a rispettivamente a 1200, 1500, 2000 e 2500 giri/min e di avanzamento (v) pari rispettivamente a 30, 60 e 100 mm/min.

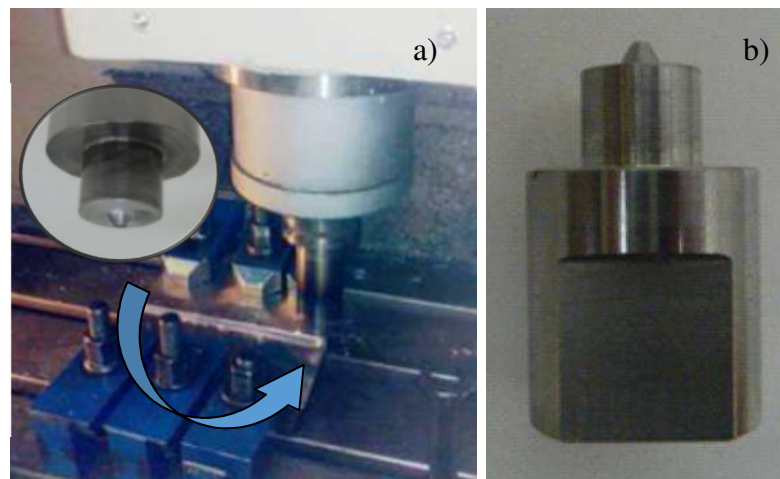


Figura 2.2: a) Particolare del processo di saldatura FSW al CNC e b) utensile per le prove di FSW

Capitolo 2 *Friction Stir Welding*

La potenza assorbita dalla macchina durante tutto il processo è stata calcolata attraverso un amperometro, opportunamente collegato al centro di lavoro, che ha registrato i valori dell'intensità di corrente i quali, poi, sono stati convertiti in potenza.

Mentre, le proprietà meccaniche dei giunti saldati sono state valutate attraverso delle prove di trazione effettuate a temperatura ambiente con una macchina di prova servoidraulica MTS 810 System con cella di carico da 250 kN (figura 2.3). I campioni sono stati ricavati, rispettando i criteri di forma e dimensioni riportati nella normativa UNI-EN 10002/5, con direzione di applicazione del carico perpendicolare alla linea di saldatura



Figura 2.3: Macchina di prova servoidraulica MTS 810 System

2.2.3 Metodologia LCA (Life Cycle Assessment)

I risultati ottenuti dalle prove sperimentali sono stati utilizzati come input per eseguire lo studio LCA per valutare l'impatto ambientale del processo di FSW. La prima attività è stata realizzare l'analisi dell'inventario (LCI), cioè la ricerca degli input, ossia di tutti gli elementi come combustibili, risorse e quantità di energia elettrica utilizzate nel processo, e degli output, cioè tutti i tipi di emissioni prodotte: emissioni in aria, in acqua, nel terreno ed eventuali materiali sottoposti a smaltimento o riciclo.

Nell'analisi LCA non sono stati considerati il trasporto delle materie prime fino al centro di saldatura e i possibili utilizzi delle lamiere saldate.

Invece, poiché però il processo di giunzione FSW produce della bava (*welding flash*), dovuta all'affondamento dell'utensile, lungo il cordone di saldatura, si è ritenuto opportuno considerare l'energia necessaria per asportarla attraverso un'operazione di sbavatura realizzata per mezzo di una fresa.

Analogamente, è stata considerata l'energia teorica assorbita da un'operazione di tranciatura (2.1), necessaria per eliminare le estremità della lamiera dove si verificano dei difetti dovuti all'ingresso e all'uscita dell'utensile usato per il processo di saldatura FSW.

$$L = k_p \cdot F_t \cdot s \quad (2.1)$$

Dove:

- K_p = coefficiente di tranciatura
- F_t = forza di taglio
- s = spessore della lamiera

L'input considerato, quindi, è stato il consumo di energia elettrica per realizzare l'operazione di saldatura, sbavatura e tranciatura. Per quanto concerne gli output, essi sono l'olio lubrificante, che sarà indirizzato verso lo smaltimento, adoperato dalla macchina per lubrificare gli organi meccanici che si occupano della

movimentazione del mandrino e della tavola portapezzo, e la bava che tenderà a formarsi durante il processo, la quale verrà messa da parte per una futura rifusione.

Il modello di calcolo utilizzato per la realizzazione dell'analisi LCA è SimaPro (*System for Integrated Environmental Assessment of Products*) nella versione 7.1, prodotto dalla società olandese PRÉ (Product Ecology Consultant).

Esso, permette di raccogliere, monitorare, analizzare le prestazioni ambientali di prodotti e servizi, esaminando cicli di vita anche complessi, secondo le raccomandazioni delle norme della serie ISO 14040.

Il metodo di valutazione ambientale denominato *Impact 2002+*, contenuto all'interno del *Simapro*, permette di raggruppare i risultati dell'LCI in 14 categorie di impatto *midpoint* (che diventano 15 se si considera che la categoria "Human Toxicity" sia suddivisa in "Carcinogenic" e "Non-carcinogenic") collegate a loro volta a 4 categorie di danno endpoint [34], come mostrato in figura 2.4:

- "*Human health*", espressa in DALY e derivata dalle 5 midpoint categories Human toxicity, Respiratory (inorganics), Ionizing radiations, Ozone layer depletion, Photochemical oxidation (corrispondente alla voce Respiratory (organics) for human health);
- "*Ecosystem quality*", espressa in PDF·m²·yr; derivata dalle midpoint categories Acquatic ecotoxicity, Terrestrial ecotoxicity, Terrestrial acidification / nitrification, Acquatic acidification, Acquatic eutrophication e Land occupation, alle quali potrebbero essere aggiunto l'apporto delle 10 midpoint categories già incontrate in Human Health, Photochemical oxidation e Ozone layer depletion. Ma quest'ultimo collegamento non è stato ancora determinato quantitativamente.

- “*Climate change*”, misurata in kg di CO2 equivalente in aria, derivata dall’unica categoria di impatto Global warming;
- “*Resources*”, espressa in MJ costruita a partire dalle midpoint categories Non renewable energy e Mineral extraction.

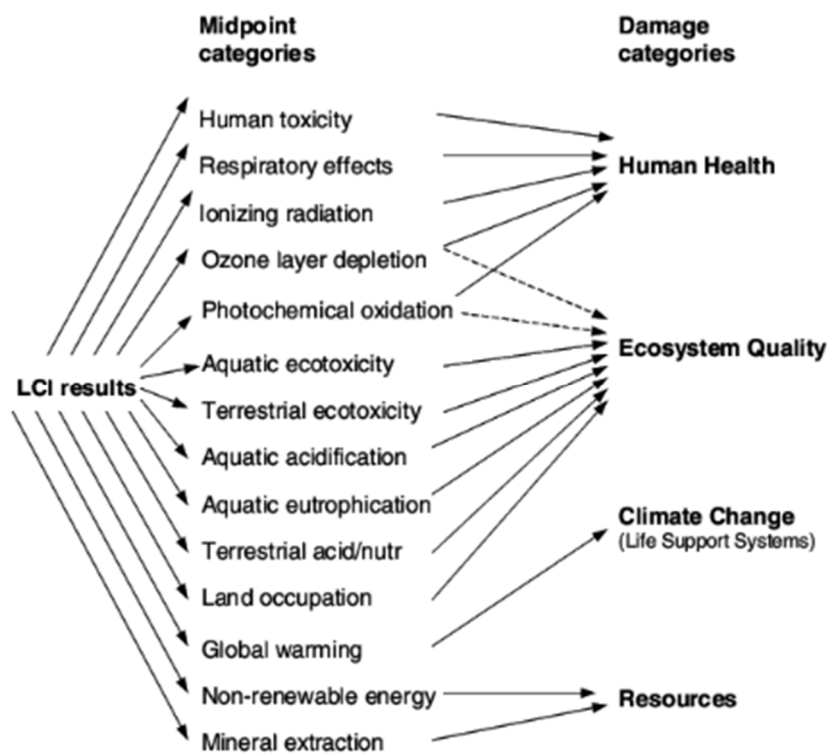


Figura 2.4: Schema Impact 2002+

Obiettivo principale comune a tutte le categorie di impatto è la determinazione degli effetti a lungo termine ottenuta mediante l’uso di un orizzonte temporale (*time horizon*) infinito (approssimato da un time horizon di 500 anni).

2.2.4 Risultati sperimentali e discussione

2.2.4.1 Influenza dei parametri di processo sull'impatto ambientale

La tabella 2.1 riassume i valori dell'energia elettrica consumata durante il processo di FSW, in funzione delle diverse velocità di rotazione ed avanzamento investigate nel presente studio.

Tabella 2.1: Energia assorbita durante il processo di FSW

Energia assorbita [MJ]		ω [rpm]			
		1200	1500	2000	2500
v [mm/min]	30	0.82888	0.90804	0.89047	0.88341
	60	0.51478	0.5508	0.53326	0.5200
	100	0.37112	0.40229	0.38593	0.3801

Come mostrato in figura 2.5a, a parità di velocità di rotazione dell'utensile ω , un aumento della velocità di avanzamento v comporta una forte riduzione dell'energia assorbita durante il processo di FSW, così come una riduzione dei tempi di produzione. Invece, a parità di v , l'aumento di ω da 1200 a 1500 giri/min, comporta il maggior consumo di energia necessario per far girare più velocemente il mandrino. In seguito, l'incremento della velocità di rotazione fino a 2500 giri/min non comporta un ulteriore aumento dell'energia assorbita ma,

Capitolo 2 *Friction Stir Welding*

piuttosto, un andamento leggermente decrescente. Tale comportamento può essere attribuito all'effetto di addolcimento del materiale che fa diminuire la forza all'aumentare di ω [34]. Tale effetto, anche se minimo, prevale sull'energia spesa ed è sistematico come si può vedere nella figura 2.5b.

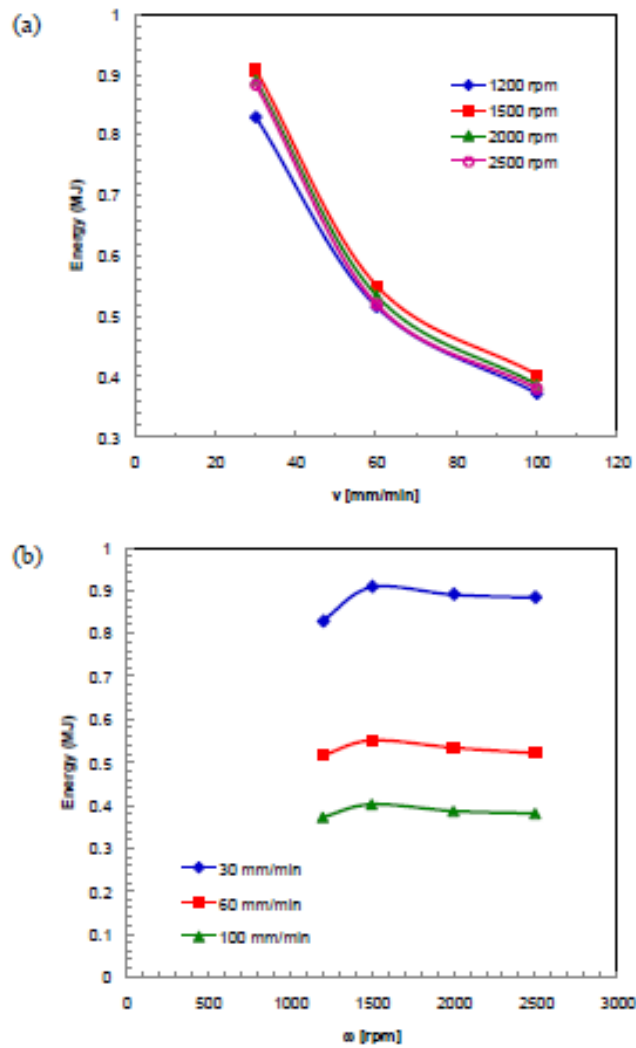


Figura 2.5: Effetto dei parametri di processo sul consumo di energia durante il processo di FSW

Capitolo 2 Friction Stir Welding

Quindi, partendo dall'analisi d'inventario sono state svolte le fasi di caratterizzazione, normalizzazione, valutazione dei danni e ponderazione secondo le specifiche del metodo Impact 2002+.

Tabella 2.2: Caratterizzazione midpoint

Categoria d'impatto	Unità	$\omega = 1200 \text{ rpm}$ $v = 100 \text{ mm/min}$	$\omega = 1200 \text{ rpm}$ $v = 60 \text{ mm/min}$	$\omega = 1200 \text{ rpm}$ $v = 30 \text{ mm/min}$	$\omega = 1500 \text{ rpm}$ $v = 100 \text{ mm/min}$	$\omega = 1500 \text{ rpm}$ $v = 60 \text{ mm/min}$	$\omega = 1500 \text{ rpm}$ $v = 30 \text{ mm/min}$
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	0,00017	0,00024	0,00038	0,000186	0,000254	0,000419
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	0,00015	0,0002	0,00033	0,00016	0,000219	0,000361
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	3,80E-05	5,26E-05	8,48E-05	4,11E-05	5,63E-05	9,29E-05
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	1,14138	1,58321	2,54922	1,237259	1,694089	2,792692
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	5,28E-09	7,32E-09	1,18E-08	5,72E-09	7,83E-09	1,29E-08
Respiratory organics	kg C2H4 eq	1,14E-05	1,58E-05	2,55E-05	1,24E-05	1,70E-05	2,80E-05
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	2,3361	3,2404	5,21758	2,532341	3,467349	5,715899
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	0,62173	0,8624	1,38861	0,673958	0,922801	1,521231
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	0,00087	0,00121	0,00194	0,000943	0,001291	0,002128
Land occupation	m2org.arable	7,87E-05	0,00011	0,00018	8,53E-05	0,000117	0,000193
Aquatic acidification	kg SO2 eq	0,00028	0,00039	0,00063	0,000304	0,000416	0,000687
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	6,83E-06	9,48E-06	1,53E-05	7,41E-06	1,01E-05	1,67E-05
Global warming	kg CO2 eq	0,05849	0,08113	0,13063	0,063401	0,08681	0,143105
Non-renewable energy	MJ primary	0,94428	1,30981	2,109	1,023599	1,401539	2,310426
Mineral extraction	MJ surplus	0,00011	0,00015	0,00024	0,000117	0,00016	0,000263

Categoria d'impatto	Unità	$\omega = 2000 \text{ rpm}$ $v = 100 \text{ mm/min}$	$\omega = 2000 \text{ rpm}$ $v = 60 \text{ mm/min}$	$\omega = 2000 \text{ rpm}$ $v = 30 \text{ mm/min}$	$\omega = 2500 \text{ rpm}$ $v = 100 \text{ mm/min}$	$\omega = 2500 \text{ rpm}$ $v = 60 \text{ mm/min}$	$\omega = 2500 \text{ rpm}$ $v = 30 \text{ mm/min}$
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	0,000178	0,000246	0,000399	0,00018	0,00024	0,000408
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	0,000154	0,000212	0,000344	0,00015	0,000207	0,000351
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	3,95E-05	5,45E-05	8,86E-05	3,89E-05	5,32E-05	9,03E-05
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	1,186926	1,640031	2,662869	1,16894	1,599381	2,716926
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	5,49E-09	7,58E-09	1,23E-08	5,40E-09	7,39E-09	1,26E-08
Respiratory organics	kg C2H4 eq	1,19E-05	1,64E-05	2,67E-05	1,17E-05	1,60E-05	2,72E-05
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	2,429322	3,356708	5,450185	2,39251	3,273509	5,660826
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	0,64654	0,893355	1,450513	0,63674	0,871212	1,47996
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	0,000904	0,001249	0,002029	0,00089	0,001218	0,00207
Land occupation	m2org.arable	8,18E-05	0,000113	0,000184	8,06E-05	0,00011	0,000187
Aquatic acidification	kg SO2 eq	0,000292	0,000403	0,000655	0,00029	0,000393	0,000668
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	7,11E-06	9,82E-06	1,59E-05	7,00E-06	9,58E-06	1,63E-05
Global warming	kg CO2 eq	0,060821	0,08404	0,136453	0,0599	0,081957	0,139223
Non-renewable energy	MJ primary	0,981958	1,356816	2,203022	0,96708	1,323187	2,247744
Mineral extraction	MJ surplus	0,000112	0,000155	0,000251	0,00011	0,000151	0,000256

Capitolo 2 *Friction Stir Welding*

I fattori di caratterizzazione per le diverse categorie di impatto sono basati su un principio di equivalenza, cioè i punteggi assegnati alle diverse sostanze sono espressi in kg-equivalenti di una sostanza di riferimento

Nella tabella 2.2 vengono riportati i risultati ottenuti dalle operazioni di caratterizzazione sulle varie categorie di midpoint nelle diverse condizioni di v ed ω investigate.

Successivamente, i risultati ottenuti dalle operazioni di caratterizzazione vengono *normalizzati* (tabella 2.3), ovvero vengono elaborati in modo da poter confrontare i risultati ottenuti nelle diverse categorie d'impatto.

Nella normalizzazione è indispensabile scegliere una situazione di riferimento sia in termini di spazio che di tempo, poichè, dovrà essere la medesima per tutte le categorie di impatto se si vuole passare alla ponderazione. La ponderazione viene utilizzata quando è preferibile avere un unico punteggio piuttosto di una serie di valori che possono risultare difficili da confrontare. I metodi di ponderazione stabiliscono dei “pesi” per ciascun impatto ambientale; moltiplicando i valori della caratterizzazione per il rispettivo peso e sommando i valori così ottenuti si ottiene un indice adimensionale dell'impatto totale.

Capitolo 2 *Friction Stir Welding*

Tabella 2.3: Normalizzazione midpoint

Categoria d'impatto	Unità	$\omega = 1200$ rpm $v = 100$ mm/min	$\omega = 1200$ rpm $v = 60$ mm/min	$\omega = 1200$ rpm $v = 30$ mm/min	$\omega = 1500$ rpm $v = 100$ mm/min	$\omega = 1500$ rpm $v = 60$ mm/min	$\omega = 1500$ rpm $v = 30$ mm/min
Carcinogens		6,76E-08	9,38E-08	1,51E-07	7,33E-08	1,00E-07	1,65E-07
Non-carcinogens		5,83E-08	8,08E-08	1,30E-07	6,32E-08	8,65E-08	1,43E-07
Respiratory inorganics		3,75E-06	5,20E-06	8,37E-06	4,06E-06	5,56E-06	9,17E-06
Ionizing radiation		3,38E-08	4,69E-08	7,55E-08	3,66E-08	5,02E-08	8,27E-08
Ozone layer depletion		7,81E-10	1,08E-09	1,74E-09	8,47E-10	1,16E-09	1,91E-09
Respiratory organics		3,43E-09	4,76E-09	7,66E-09	3,72E-09	5,09E-09	8,40E-09
Aquatic ecotoxicity		8,56E-09	1,19E-08	1,91E-08	9,28E-09	1,27E-08	2,09E-08
Terrestrial ecotoxicity		3,59E-07	4,98E-07	8,02E-07	3,89E-07	5,33E-07	8,78E-07
Terrestrial acid/nutri		6,60E-08	9,16E-08	1,47E-07	7,16E-08	9,80E-08	1,62E-07
Land occupation		6,26E-09	8,69E-09	1,40E-08	6,79E-09	9,30E-09	1,53E-08
Aquatic acidification		-	-	-	-	-	-
Aquatic eutrophication		-	-	-	-	-	-
Global warming		5,91E-06	8,19E-06	1,32E-05	6,40E-06	8,77E-06	1,45E-05
Non-renewable energy		6,21E-06	8,62E-06	1,39E-05	6,74E-06	9,22E-06	1,52E-05
Mineral extraction		7,08E-10	9,82E-10	1,58E-09	7,68E-10	1,05E-09	1,73E-09

Categoria d'impatto	Unità	$\omega = 2000$ rpm $v = 100$ mm/min	$\omega = 2000$ rpm $v = 60$ mm/min	$\omega = 2000$ rpm $v = 30$ mm/min	$\omega = 2500$ rpm $v = 100$ mm/min	$\omega = 2500$ rpm $v = 60$ mm/min	$\omega = 2500$ rpm $v = 30$ mm/min
Carcinogens		7,03E-08	9,71E-08	1,58E-07	6,92E-08	9,47E-08	1,61E-07
Non-carcinogens		6,06E-08	8,37E-08	1,36E-07	5,97E-08	8,17E-08	1,39E-07
Respiratory inorganics		3,90E-06	5,38E-06	8,74E-06	3,84E-06	5,25E-06	8,92E-06
Ionizing radiation		3,51E-08	4,86E-08	7,88E-08	3,46E-08	4,74E-08	8,04E-08
Ozone layer depletion		8,12E-10	1,12E-09	1,82E-09	8,00E-10	1,09E-09	1,86E-09
Respiratory organics		3,57E-09	4,93E-09	8,01E-09	3,51E-09	4,81E-09	8,17E-09
Aquatic ecotoxicity		8,90E-09	1,23E-08	2,00E-08	8,77E-09	1,20E-08	2,04E-08
Terrestrial ecotoxicity		3,73E-07	5,16E-07	8,38E-07	3,68E-07	5,03E-07	8,55E-07
Terrestrial acid/nutri		6,87E-08	9,49E-08	1,54E-07	6,76E-08	9,25E-08	1,57E-07
Land occupation		6,51E-09	9,00E-09	1,46E-08	6,41E-09	8,78E-09	1,49E-08
Aquatic acidification		-	-	-	-	-	-
Aquatic eutrophication		-	-	-	-	-	-
Global warming		6,14E-06	8,49E-06	1,38E-05	6,05E-06	8,28E-06	1,41E-05
Non-renewable energy		6,46E-06	8,93E-06	1,45E-05	6,36E-06	8,71E-06	1,48E-05
Mineral extraction		7,36E-10	1,02E-09	1,65E-09	7,25E-10	9,92E-10	1,69E-09

Dai dati normalizzati in tabella 2.3, si può notare che le categorie nelle quali abbiamo gli impatti maggiori sono rispettivamente lo sfruttamento delle fonti di energia non rinnovabili, il riscaldamento globale, gli effetti sull'apparato respiratorio (dovuto a composti inorganici) e sull'ecotossicità terrestre; mentre

Capitolo 2 Friction Stir Welding

le restanti categorie sono praticamente nulle. In figura 2.6, vengono graficati gli impatti più significativi nelle diverse condizioni di processo investigate.

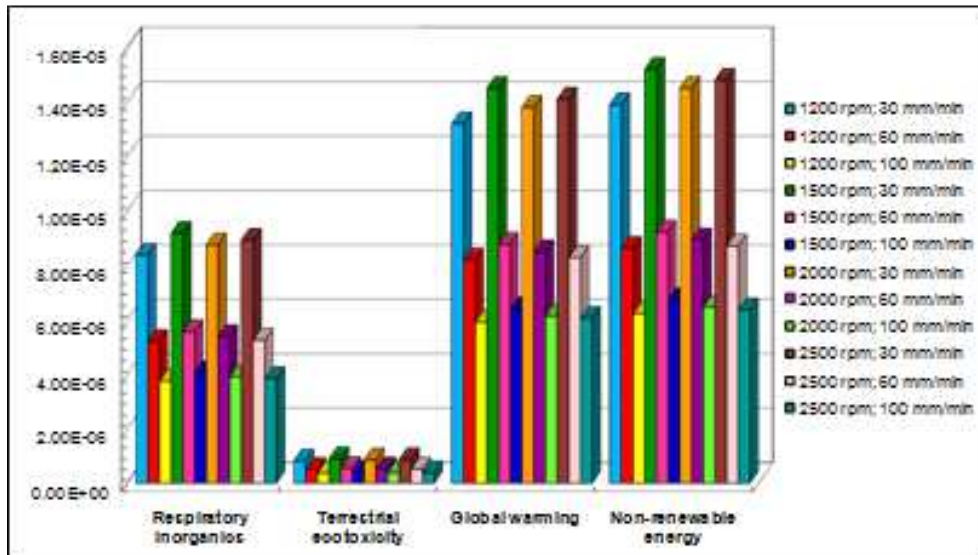


Figura 2.6: Effetto dei parametri di processo sui midpoint

Mentre, nella tabella 2.4 vengono riportati i risultati relativi alla caratterizzazione delle 4 categorie *endpoint* di valutazione dei danni in cui vanno a confluire le 15 categorie d'impatto.

Tabella 2.4: Caratterizzazione endpoint

Categoria d'impatto	Unità	$\omega = 1200$ rpm $v = 100$ mm/min	$\omega = 1200$ rpm $v = 60$ mm/min	$\omega = 1200$ rpm $v = 30$ mm/min	$\omega = 1500$ rpm $v = 100$ mm/min	$\omega = 1500$ rpm $v = 60$ mm/min	$\omega = 1500$ rpm $v = 30$ mm/min
Human health	DALY	2,77E-08	3,85E-08	6,19E-08	3,01E-08	4,12E-08	6,79E-08
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,006025303	0,0083577	0,01345722	0,006531438	0,008943019	0,0147425
Climate change	kg CO2 eq	0,05848757	0,0811279	0,13062915	0,063400613	0,086809819	0,14310533
Resources	MJ primary	0,94438562	1,3099542	2,1092394	1,0237154	1,4016986	2,3106896

Capitolo 2 Friction Stir Welding

Categoria d'impatto	Unità	$\omega = 2000$ rpm $v = 100$ mm/min	$\omega = 2000$ rpm $v = 60$ mm/min	$\omega = 2000$ rpm $v = 30$ mm/min	$\omega = 2500$ rpm $v = 100$ mm/min	$\omega = 2500$ rpm $v = 60$ mm/min	$\omega = 2500$ rpm $v = 30$ mm/min
Human health	DALY	2,88E-08	3,98E-08	6,47E-08	2,84E-08	3,89E-08	6,60E-08
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,006265731	0,0086577	0,01405717	0,006170796	0,008443064	0,014342536
Climate change	kg CO2 eq	0,060821402	0,0840398	0,13645282	0,059899865	0,081956757	0,13922288
Resources	MJ primary	0,98206948	1,356971	2,203273	0,96718964	1,3233373	2,2480005

Poiché gli indicatori sono espressi in unità di misura differenti, anche in questo caso è necessario effettuare l'operazione di normalizzazione per avere un confronto diretto tra le 4 categorie di *endpoint* (tabella 2.5).

In questo modo la normalizzazione consente di valutare l'entità dell'impatto ambientale generato dal processo oggetto dello studio, in relazione al carico ambientale totale relativo all'area geografica in cui il ciclo produttivo si colloca.

Tabella 2.5: Normalizzazione endpoint

Categoria d'impatto	Unità	$\omega = 1200$ rpm $v = 100$ mm/min	$\omega = 1200$ rpm $v = 60$ mm/min	$\omega = 1200$ rpm $v = 30$ mm/min	$\omega = 1500$ rpm $v = 100$ mm/min	$\omega = 1500$ rpm $v = 60$ mm/min	$\omega = 1500$ rpm $v = 30$ mm/min
Human health		3,91E-06	5,42E-06	8,73E-06	4,24E-06	5,80E-06	9,57E-06
Ecosystem quality		4,40E-07	6,10E-07	9,82E-07	4,77E-07	6,53E-07	1,08E-06
Climate change		5,91E-06	8,19E-06	1,32E-05	6,40E-06	8,77E-06	1,45E-05
Resources		6,21E-06	8,62E-06	1,39E-05	6,74E-06	9,22E-06	1,52E-05

Categoria d'impatto	Unità	$\omega = 2000$ rpm $v = 100$ mm/min	$\omega = 2000$ rpm $v = 60$ mm/min	$\omega = 2000$ rpm $v = 30$ mm/min	$\omega = 2500$ rpm $v = 100$ mm/min	$\omega = 2500$ rpm $v = 60$ mm/min	$\omega = 2500$ rpm $v = 30$ mm/min
Human health		4,07E-06	5,62E-06	9,12E-06	4,00E-06	5,48E-06	9,31E-06
Ecosystem quality		4,57E-07	6,32E-07	1,03E-06	4,50E-07	6,16E-07	1,05E-06
Climate change		6,14E-06	8,49E-06	1,38E-05	6,05E-06	8,28E-06	1,41E-05
Resources		6,46E-06	8,93E-06	1,45E-05	6,36E-06	8,71E-06	1,48E-05

Per avere una migliore comprensione dei risultati riportati in tabella 2.5, essi vengono graficati attraverso un istogramma (figura 2.7).

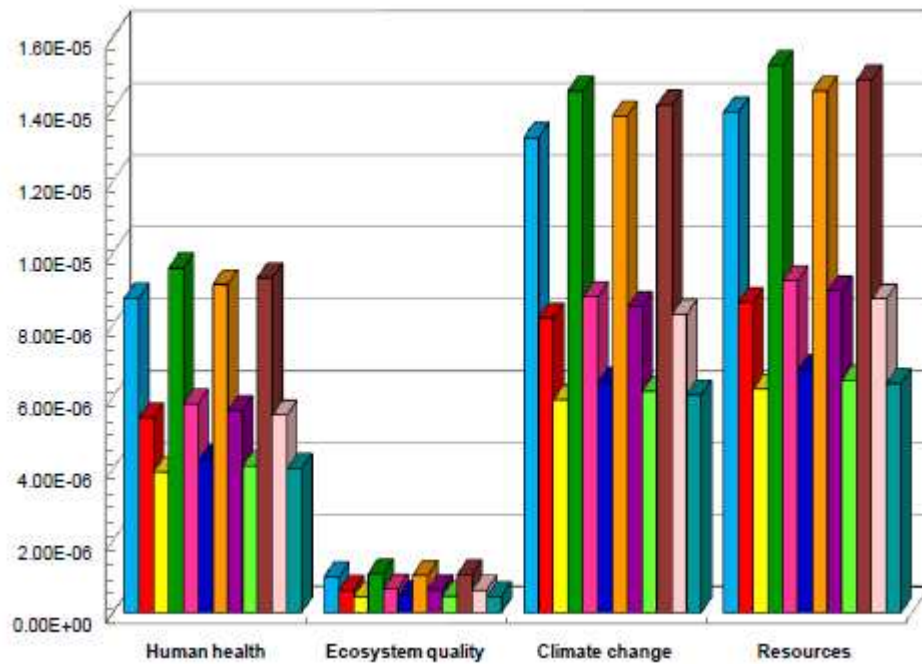


Figura 2.7: Effetto dei parametri di processo sugli endpoint

Dalla figura 2.7 si può notare come le categorie di danno relative ai cambiamenti climatici e al consumo di risorse sono quelle con l'impatto maggiore; ciò può essere ricollegato all'utilizzo del gas metano, petrolio e carbone necessari per la produzione di elettricità.

Allo stesso tempo, questo porta ad assegnare una forte porzione di danno anche alla salute umana, poiché la combustione degli idrocarburi è, fortemente, responsabile della formazione e dell'immissione nell'ambiente di particelle inorganiche e cancerogene. Infine, quella dei danni alla qualità degli ecosistemi (tossicità dell'acqua, sfruttamento del sottosuolo, ecc.) risulta essere la meno compromessa.

Infine, per valutare l'impatto globale, tutti i valori normalizzati degli endpoint, per le diverse combinazioni di parametri di processo investigate, vengono

sommati per ottenere un unico indice (Environmental Impact Index). I risultati di tale operazione vengono mostrati in figura 2.8.

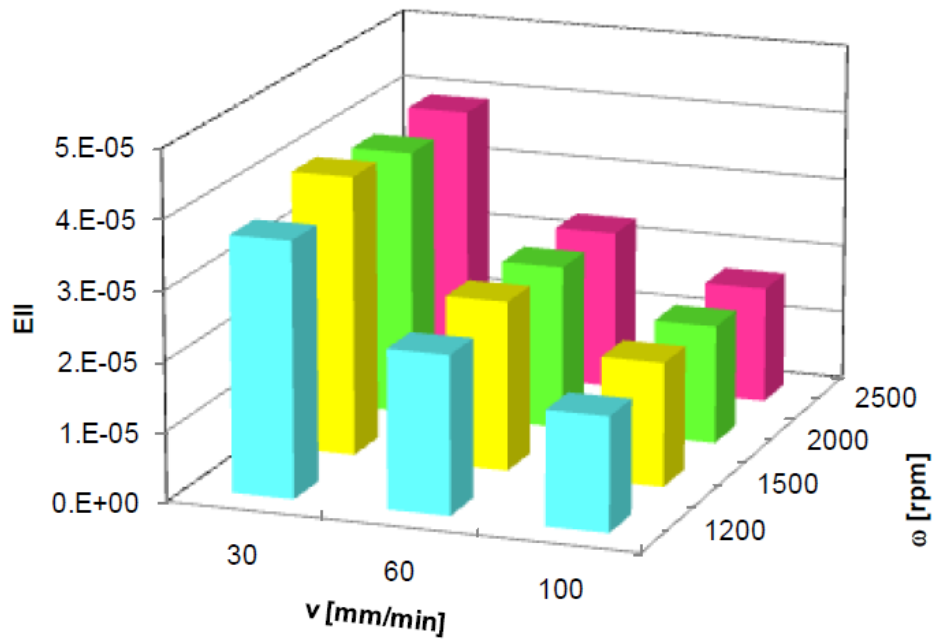


Figura 2.8: Indice di impatto ambientale per le diverse condizioni di processo investigate

Si può vedere dalla figura 2.8 che la saldatura caratterizzata da un minor impatto ambientale è quella realizzata rispettivamente con una velocità di rotazione dell'utensile pari a 1200 giri/min ed una velocità di avanzamento pari a 100 mm/min.

2.2.4.2 Correlazione tra impatto ambientale e proprietà meccaniche dei giunti

Come già anticipato, per valutare le proprietà meccaniche dei giunti, ottenuti con le diverse condizioni di processo investigate, sono state effettuate delle prove di trazione in direzione ortogonale rispetto alla direzione di saldatura.

Il quadro delle prove eseguite è riportato in figura 2.9. Ognuna delle prove è stata ripetuta almeno tre volte per verificarne la ripetibilità.

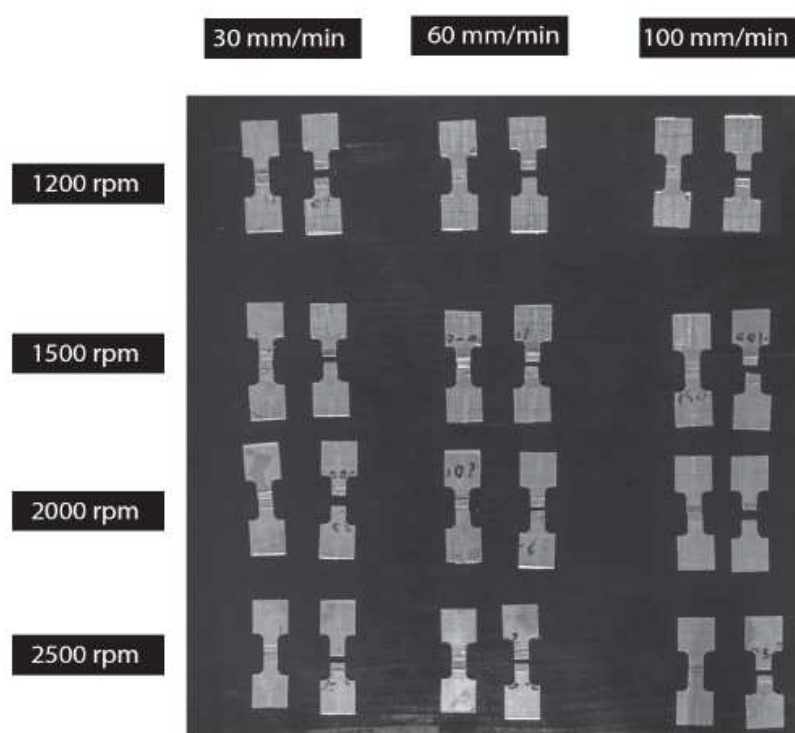


Figura 2.9: Provini saldati con FSW prima e dopo prova di trazione

In figura 2.10 troviamo i risultati delle diverse prove di trazione, in termini di curve sforzo-deformazione.

Capitolo 2 Friction Stir Welding

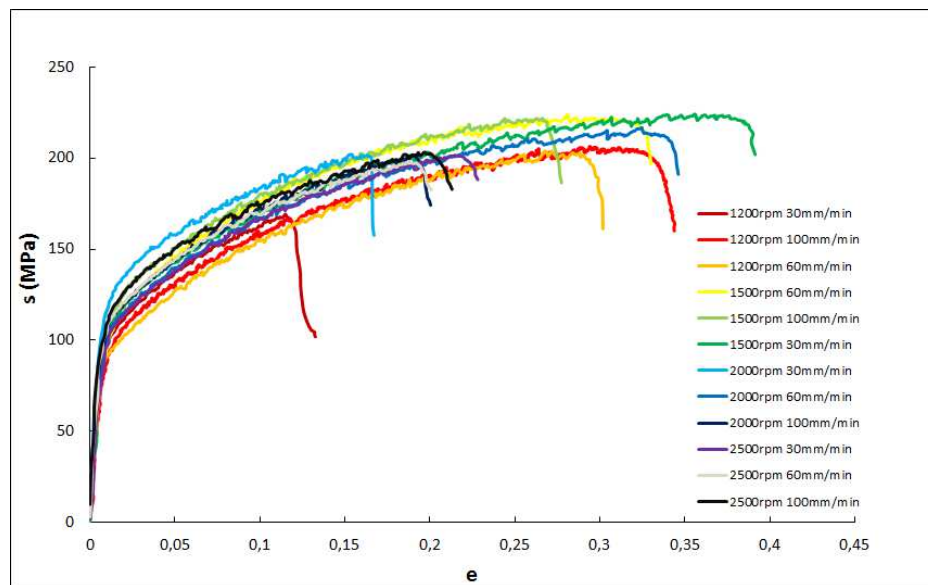


Figura 2.10: Risultati prove di trazione

In tabella 2.6, invece, si riportano i valori ricavati dalle suddette curve ingegneristiche per i parametri meccanici di interesse, nello specifico la resistenza a trazione (UTS) e l'allungamento percentuale a rottura (UE).

Tabella 2.6: Risultati prove di trazione

		[rpm]				
		[mm/min]	1200	1500	2000	2500
UTS [MPa]	30		169.19	223.38	201.67	201.36
	60		203.82	222.00	218.03	197.31
	100		206.33	221.67	202.50	201.25
UE [%]	30		11.60	38.40	19.34	19.00
	60		29.60	32.80	33.80	19.30
	100		33.16	26.70	20.00	19.95

Come si può notare dalla tabella 2.6, nei giunti ottenuti con la velocità di rotazione pari a 1500 giri/min, indipendentemente da v , si sono registrati i valori maggiori di resistenza a trazione e allungamento percentuale a rottura.

Però, allo stesso tempo, tale condizione di velocità di rotazione dell'utensile è quella che ha fatto registrare il maggior consumo di energia elettrica (figura 2.5) ed il peggior impatto ambientale (figura 2.8) per ogni condizione di v investigata. Alla luce di ciò, è stato interessante stabilire una relazione tra l'impatto ambientale del processo di FSW e le proprietà meccaniche dei giunti.

Per questo motivo si è proceduto alla definizione di due indici:

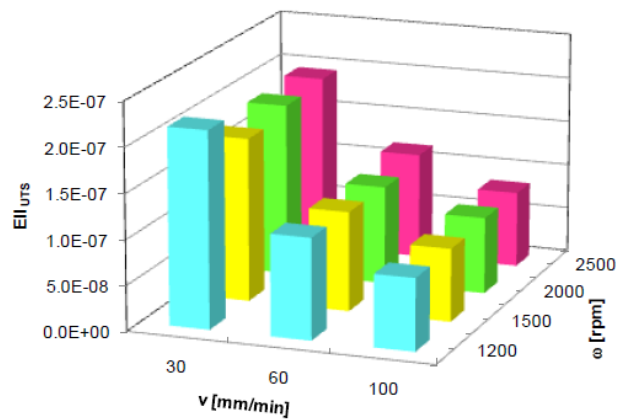
$$EII_{UTS} = \frac{EII}{UTS} \quad (2.1)$$

$$EII_{UE} = \frac{EII}{UE} \quad (2.2)$$

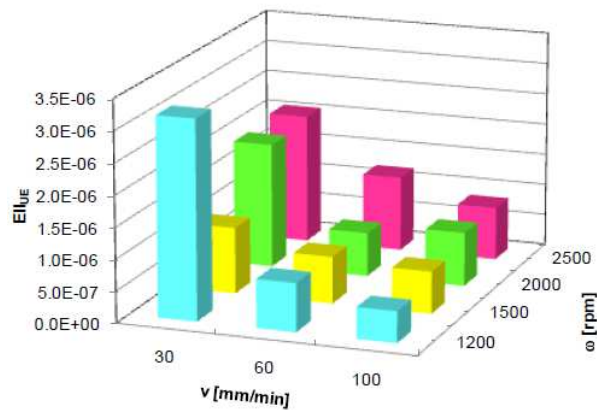
dove:

- EII: Indice di Impatto Ambientale
- UTS: Resistenza a trazione
- UE: Allungamento percentuale a rottura

In figura 2.11 vengono mostrati i risultati degli indici calcolati attraverso i rapporti 2.1 e 2.2 in funzione dei parametri di processo.



(a)



(b)

Figura 2.11: Effetto dei parametri di processo su (a) EII_{UTS} e (b) EII_{UE}

Si può notare dalla figura 2.11a, che a parità di velocità di rotazione, l'EII_{UTS} decresce all'aumentare del valore della velocità di avanzamento, in accordo con il trend mostrato in figura 2.8. Così come l'aumento della velocità di rotazione è in accordo con quanto visto in figura 2.8.

Al contrario, EII_{UE} mostra un comportamento discordante con quello dell'EII, poichè la condizione con $\omega = 1500$ giri/min e $v = 30$ mm/min, che è risultata essere la peggiore dal punto di vista dell'EII, in questo caso mostra un basso

valore dell' EII_{UE} . Inoltre, nell'intervallo di ω (da 1200 a 1500 giri/min) e di v (da 60 a 100 mm/min) si può notare un'area contraddistinta da bassi valori dell' EII_{UE} , ciò sta ad indicare come la duttilità possa avere un effetto benefico sull'impatto ambientale [35].

Dall'analisi dei dati riportati nei grafici delle figure 2.11a e 2.11b si evince come la condizione che garantisce il miglior compromesso tra sostenibilità ambientale e proprietà meccaniche, in termini di resistenza a trazione ed allungamento percentuale a rottura, è quella con una velocità di rotazione dell'utensile pari a 1200 giri/min ed una velocità di avanzamento dell'utensile pari a 100 mm/min.

2.3 Previsione della forza verticale con reti neurali artificiali

2.3.1 Obiettivo dello studio

Le reti neurali costituiscono oggi uno dei modelli matematici più sofisticati e complessi per l'elaborazione delle informazioni. In campo applicativo, questo le rende uno strumento particolarmente interessante per varie motivazioni. La prima è che esse, essendo come si suol dire, modelli a memoria associativa, imparano direttamente da esempi e non richiedono particolari conoscenze a priori sulla realtà che si vuole esaminare il che, in alcuni casi, le pone come unico approccio percorribile per la risoluzione dei problemi di estrazione dell'informazione. La seconda è la loro caratteristica di robustezza e tolleranza al rumore. Questa deriva dalla natura al tempo stesso parallela e distribuita in cui si struttura il modello neurale. Una terza importante motivazione risiede poi nelle proprietà di flessibilità e portabilità che caratterizzano questo tipo di algoritmi. La rete infatti riesce a fondere in maniera sinergica e costruttiva

elementi informativi provenienti da sorgenti fisicamente anche molto differenti tra loro. Per tali motivi, le Reti Neurali si sono diffuse in tutti quei campi dove i modelli analitici hanno fallito oppure dove la conoscenza dei dati sia incerta, insufficiente, o errata.

Ad esempio nei moderni sistemi di produzione può essere presente una grandissima varietà di materiali, di utensili e di condizioni operative; ciò comporta inevitabilmente il verificarsi di malfunzionamenti. Per far fronte agli errori, ai difetti e ai malfunzionamenti occorrono una modellistica di base dei processi produttivi e metodi di monitoraggio e controllo della produzione.

Se le condizioni del processo potessero essere sempre determinate con esattezza in anticipo, le normali tecniche di modellazione software basate su modelli matematici analitici sarebbero sufficienti. Tuttavia i guasti e le condizioni anomale del processo introducono sempre un certo grado di incertezza e di imprevedibilità, data anche dalle interconnessioni tra le diverse variabili di processo, ed è per questa ragione che nasce l'esigenza di impiegare tecniche avanzate quali quelle dell'intelligenza artificiale. L'unione delle tecnologie tradizionali con sistemi avanzati basati sulla conoscenza, come i modelli basati sulle reti neurali artificiali, consente di migliorare notevolmente il risultato finale, perché riesce ad identificare in maniera proattiva i problemi permettendo in questo modo di realizzare una produzione più efficiente e al contempo, sicuramente, più sostenibile dal punto di vista economico ed ambientale.

Negli ultimi anni, le reti neurali artificiali sono state oggetto di vari studi, al fine di risolvere problemi complessi in diversi ambiti tecnologici, quali il machining [36-39], saldature per fusione [40-45] e processi per deformazione plastica [46-53].

Per quanto concerne il Friction Stir Welding, Buffa et al. [54] hanno elaborato un modello basato sulle reti neurali artificiali per prevedere la microdurezza e la microstruttura finale nella saldatura di lamiere in lega di titanio.

Shojaeefard et al. [55] and Okuyucu et al. [56] hanno utilizzato le reti neurali per modellare la correlazione tra i parametri di processo e le proprietà meccaniche dei giunti. Altri autori [57] invece le hanno utilizzate per prevedere la temperatura, il momento torcente e la forza longitudinale. Mentre, dalla ricerca bibliografica effettuata non sono emersi lavori riguardo la previsione della forza verticale, che come già detto risulta, però, essere fondamentale sull'affondamento dell'utensile (quota del pin) e, di conseguenza, sulla buona riuscita della saldatura [58].

Nonostante la rilevante importanza di quest'ultimo, gli impianti di saldatura FSW disponibili sul mercato sono solitamente Macchine Operatrici a Controllo Numerico che attuano un controllo di posizione; mentre, non sono dotate anche di un sistema di controllo della forza verticale o, laddove tale funzionalità è prevista, l'azione viene espletata mediante dispositivi meccanici in un anello di controllo che fissa delle regole per la retroazione.

Poiché, però, lo spessore da saldare varia lungo il giunto per la tolleranza fisiologica del semilavorato, si generano delle perdite lungo l'asse Z, dette anche "perdite d'affondamento" dell'utensile (figura 2.12)

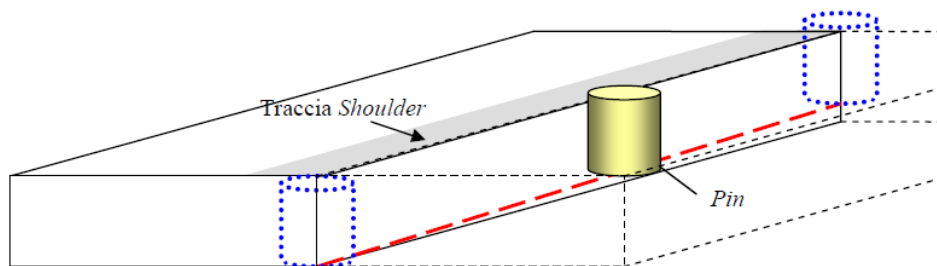


Figura 2.12: Schematizzazione Movimento Pin con Perdita di Affondamento

La perdita di affondamento è composta da due aliquote: una è dovuta all'attrezzo di fissaggio delle lamiere (che include la *backing bar*), l'altra è dovuta al supporto della testa operatrice e, per essere precisi, alla catena cinematica che

include i cuscinetti del mandrino oltre che tutti gli attuatori dell'*end effector*, come mostrato in Figura 2.13:

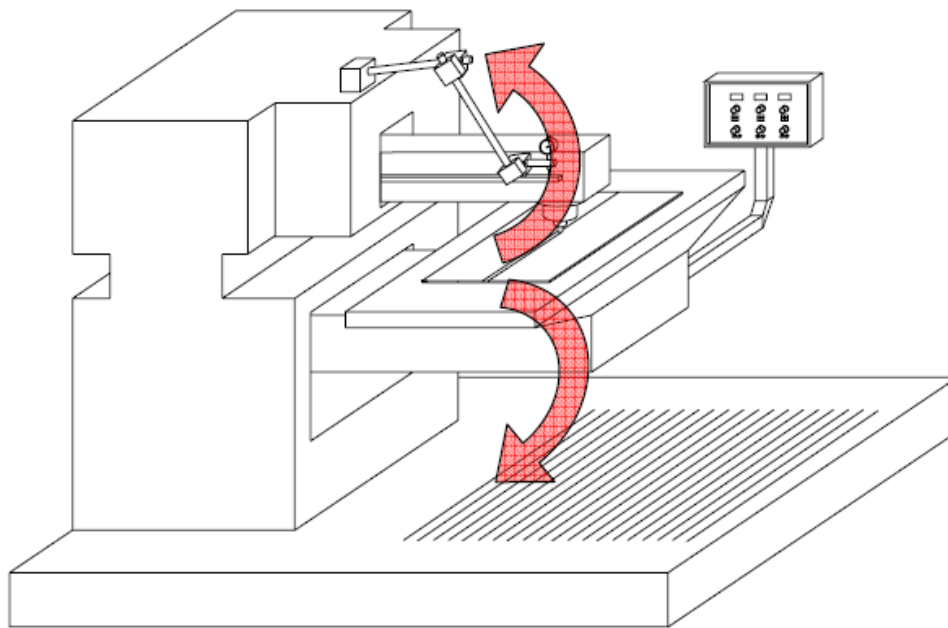


Figura 2.13: Le due aliquote che provocano la perdita di affondamento dell'utensile

Inoltre, le perdite lungo l'asse Z, dipendono anche dal tipo di materiale; in particolare, più questo è duro più le perdite saranno grandi, a causa dell'effetto delle più elevate reazioni vincolari del materiale. Infine, il tutto si complica ulteriormente se la traiettoria è più complessa e non tipicamente lineare.

Alla luce di tutto ciò, risulta quindi essere molto difficile stabilire il grado di affondamento dell'utensile ottimale, in quanto richiederebbe un numero elevato di prove sperimentali con conseguente consumo non indifferente di materia prima e di energia.

Se, però, il controllo della forza verticale e, di conseguenza, dell'affondamento venisse gestito da un algoritmo di controllo capace di compensare, durante

l'avanzamento la coordinata Z, si avrebbe che l'intero processo non avrebbe variazioni di affondamento e quindi disomogeneità delle proprietà meccaniche. In questo modo, l'intero processo di FSW verrebbe realizzato allo stesso valore ottimale di Forza verticale. Questo approccio innovativo è stato proposto anche da [61], in cui l'affondamento dell'utensile e la sua velocità di rotazione variano in funzione dello spessore della lamiera, con l'obiettivo di mantenere costante il valore della forza verticale durante l'intero processo di saldatura.

Questo sistema quindi, come accennato, consentirebbe un più elevato ritmo di produzione, un'alta precisione e riproducibilità del processo con conseguente riduzione degli scarti. In questo modo il processo di Friction Stir Welding risulterebbe essere più vantaggioso sia dal punto di vista economico ed ambientale, sia per quanto riguarda le prestazioni del giunto.

All'interno di tale contesto, il presente studio ha avuto come obiettivo la definizione e sviluppo di un modello matematico basato sulle reti neurali artificiali in grado di prevedere il valore e l'andamento della forza verticale durante il processo FSW su lamiere in lega di magnesio AZ31 al variare delle condizioni di processo in termini di velocità di rotazione (ω) e di velocità di avanzamento (v).

2.3.2 Procedure sperimentali

La saldatura FSW delle lamiere in lega di magnesio AZ31 è stata eseguita su un centro di lavoro a controllo numerico computerizzato (CNC) utilizzando un utensile in acciaio H13 (HRC = 52), con spalla del diametro di 12 mm e pin troncoconico con base di diametro 3,5 mm, un angolo di 30° e lunghezza di 1,7 mm.

Per misurare la forza verticale è stata utilizzata una piastra dinamometrica strumentata con tre celle di carico di tipo piezoelettrico KISTLER modello

Capitolo 2 Friction Stir Welding

9041A, le cui principali caratteristiche tecniche ed operative vengono riportate in figura 2.14.

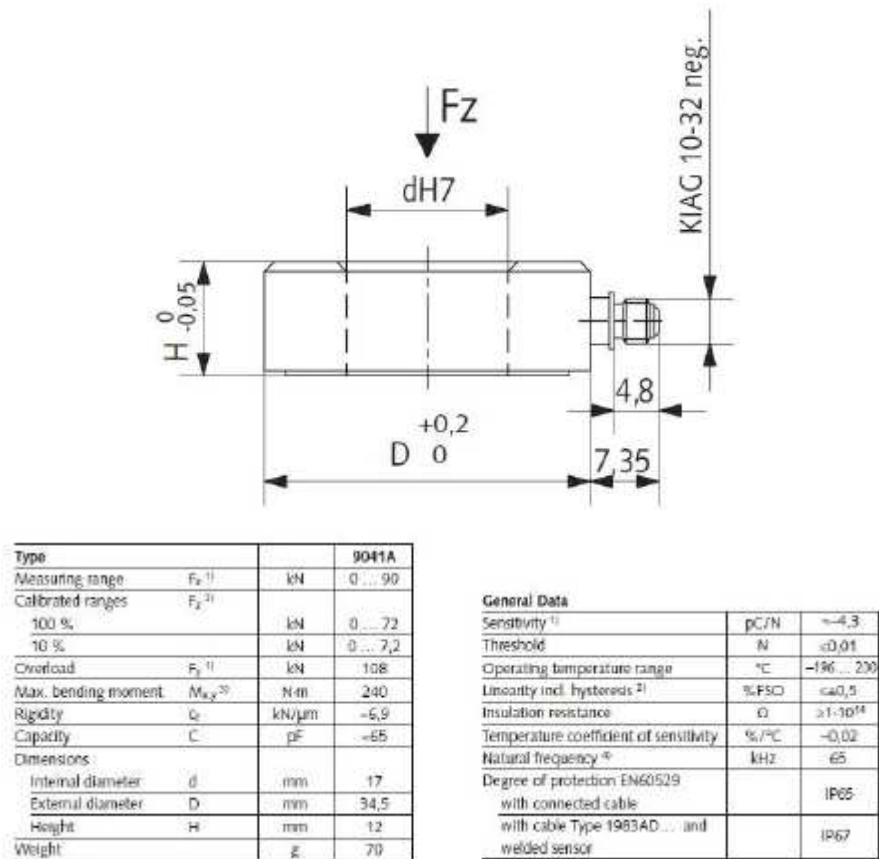
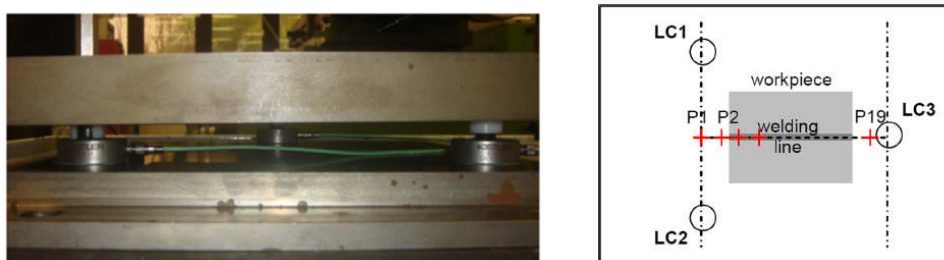


Figura 2.14: Caratteristiche tecniche ed operative cella di carico Kistler 9041A

Il fissaggio delle celle di carico sulla piastra secondo una configurazione triangolare (figura 2.15a) ed il successivo montaggio della piastra sul centro di lavoro (figura 2.15b), sono stati realizzati in modo che la linea di saldatura coincidesse con quella di misura.



(a)



Figura 2.15: (a) configurazione celle di carico su piastra dinamometrica e (b) montaggio sul centro di lavoro

La piastra, opportunamente tarata nel range 0-90 kN, è stata collegata ad un amplificatore di segnale tipo FRIBOURG modello TA-3D, quest'ultimo a sua volta ad una scheda di acquisizione dati della National Instruments che permette di digitalizzare il segnale che viene poi elaborato dal software LabVIEW per visualizzare i risultati in tempo reale.

I valori della forza verticale sono stati registrati in funzione del tempo di saldatura, con una frequenza di campionamento pari ad 1Hz.

Capitolo 2 *Friction Stir Welding*

Per costruire il dataset necessario per allenare le reti neurali sono state realizzate prove sperimentali di saldatura FSW con diverse condizioni di velocità di rotazione (ω) ed avanzamento (v), riportate in tabella 2.7.

Tabella 2.7: Condizioni di processo utilizzate per costruire il training set

v [mm/min] \ ω [rpm]	30	60	100
1200	X	X	X
1500	X	X	X
2500	X	X	X

Mentre, le due condizioni mostrate in tabella 2.8 non sono state utilizzate per la fase di allenamento (training), ma bensì per la fase di test ovvero per la verifica della capacità di generalizzazione della rete neurale progettata.

Tabella 2.8 : Condizioni utilizzate per la fase di testing

v [mm/min] \ ω [rpm]	45	80
1350		X
1700	X	

2.3.3 Reti neurali artificiali (ANN)

Per la previsione della forza verticale durante il processo di Friction Stir Welding è stata utilizzata una rete neurale artificiale del tipo *feedforward back*

propagation multistrato, costruita attraverso il software MATLAB®. Un'interessante proprietà delle reti neurali *feedforward*, che sono sicuramente il modello di rete neurale più diffuso, è quella di essere in grado di calcolare esattamente, se costruite con un numero sufficiente di elettroni, qualsiasi funzione analitica. Affinché una rete neurale funzioni è necessario che i parametri che la definiscono (architettura, funzione di attivazione, pesi sinaptici) vengano determinati in modo corretto. L'architettura di rete e la funzione di attivazione possono essere stabilite a priori in base alle conoscenze e agli obiettivi, ma per trovare dei valori corretti è necessario un processo di addestramento. In virtù di ciò, in figura 2.16 viene presentata l'architettura della rete neurale utilizzata; come si può vedere essa è caratterizzata da uno strato di ingresso composto da 4 neuroni, due strati nascosti anch'essi dotati di 4 neuroni ciascuno e uno strato di uscita comprendente un solo neurone.

Per quanto concerne gli input, dopo aver eseguito un consistente studio preliminare, sono stati scelti:

- la velocità di rotazione dell'utensile ω [giri/min]
- la velocità di avanzamento dell'utensile v [mm/min]
- il rapporto tra ω e v
- il tempo [s]

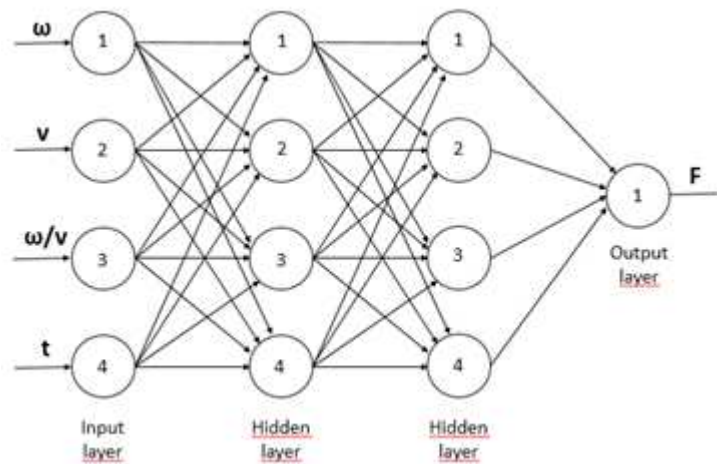


Figura 2.16: Architettura rete neurale

In tabella 2.9, invece, vengono mostrate i parametri principali utilizzati per la fase di *training*.

Tabella 2.9: Parametri utilizzati per la fase di training

Caratteristica	Tipo
Modello di rete neurale	Feed-forward back propagation
Funzione di training	Levenberg - Marquardt
Funzione di adattamento	Metodo di discesa del gradiente
Funzione di trasferimento per gli strati nascosti	Sigmoidale
Funzione di trasferimento per lo strato di uscita	Lineare
Funzione obiettivo	MSE (Errore quadratico medio)
Numero di epoche	300
Goal	0.0001

L'errore quadratico medio è stato valutato per mezzo della seguente equazione:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (F_{pred} - F_{exp})^2 \quad (2.3)$$

Dove:

- F_{pred} : Valore della forza verticale previsto dalla rete neurale
- F_{exp} : Valore della forza verticale sperimentale

L'elevata capacità di riprodurre gli esempi incontrati durante la fase di addestramento non garantisce che la rete abbia anche un'elevata capacità di generalizzazione (che è ciò a cui si ambisce): in poche parole, una rete in grado di "imparare a memoria" ma incapace di "capire" è praticamente inutile. Dopo l'addestramento, essa viene quindi "testata" per verificarne la capacità di generalizzazione. La tecnica utilizzata è denominata *Leave-one-out* ed è un metodo di convalida incrociata (*cross-validation*): in pratica, si esclude iterativamente di volta in volta una condizione in termini di ω e v , tra quelle riportate in tabella 2.7, dall'addestramento della rete e si cerca poi di prevederne i valori alla luce di ciò che è stato appreso servendosi del resto del dataset non escluso. Le condizioni escluse di volta in volta costituiscono il validation set, mentre tutte le altre usate per l'addestramento rappresentano il training set [60]. La bontà di predizione della rete viene riconosciuta valutando l'errore relativo (RE) e l'errore percentuale assoluto medio (AARE) esistente tra i valori previsti dalla rete e i valori del validation set. L'errore relativo percentuale e quello percentuale assoluto medio, sono stati calcolati attraverso le seguenti equazioni:

$$RE = \frac{F_{exp} - F_{pred}}{F_{exp}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |RE_i| \quad (2.5)$$

2.3.4 Risultati sperimentali e discussione

L'obiettivo del presente studio è stato quello di prevedere l'intero andamento della forza assiale applicata durante il processo di FSW in funzione del tempo. Il processo di Friction Stir Welding può essere suddiviso in 3 fasi principali, come mostrato in figura 2.17.

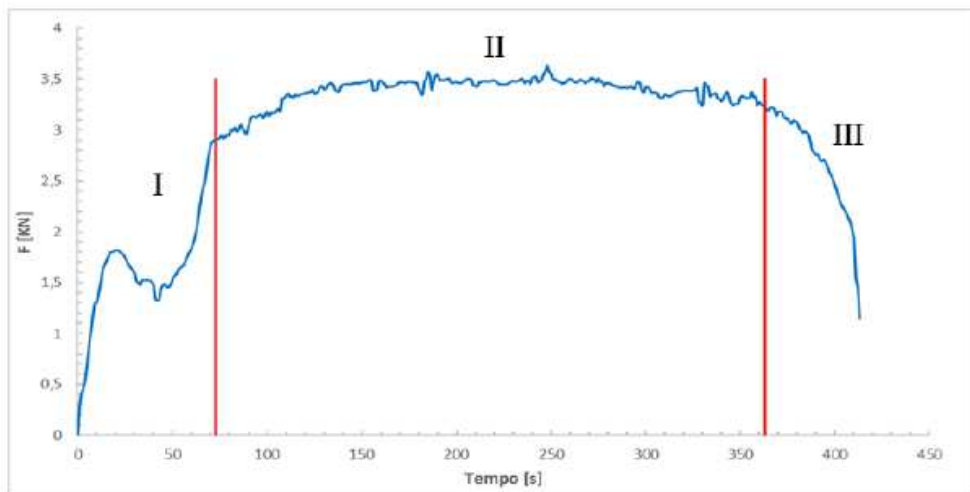


Figura 2.17: Fasi principali processo FSW

Nella prima fase il pin dell'utensile, posto in rotazione, affonda tra i lembi della lamiera da saldare facendo registrare un innalzamento della forza verticale a causa del crescente volume di materiale da mescolare. Poi la forza tende a decrescere, poiché l'innalzamento della temperatura causata dalla rotazione del pin genera un addolcimento del materiale. Nell'ultima parte della fase I la forza riprende a crescere repentinamente. Ciò è dovuto al fatto che la quantità di materiale che separa la superficie inferiore del pin rotante dalla piastra di supporto subisce un raffreddamento, a causa del trasferimento di calore verso la piastra che si trova ad una temperatura notevolmente più bassa. Inoltre un contributo a questo innalzamento del valore della forza è dato dal contatto e

Capitolo 2 *Friction Stir Welding*

affondamento dello *shoulder* con il materiale da saldare. Nella seconda fase, che rappresenta la vera e propria saldatura, viene comandato l'avanzamento dell'utensile ed il valore della forza verticale assume il valore massimo e tende a rimanere costante lungo tutto il tratto di saldatura.

L'ultima fase è relativa alla fine del processo e, di conseguenza, all'estrazione dell'utensile dal giunto saldato. Ciò, naturalmente, comporta una brusca diminuzione della forza fino al suo annullamento.

Per quanto concerne i risultati, le figure 2.18a, 2.19a, 2.20a mostrano il confronto tra le curve F-t previste con le reti neurali e quelle ottenute per via sperimentale a diverse condizioni di velocità di rotazione (ω) ed avanzamento (v). In tali figure si può osservare, chiaramente, come il modello matematico basato sulle reti neurali sia in grado di prevedere la forma della curva F-t in tutte le sue fasi caratterizzanti il processo di giunzione.

La bontà di questi risultati viene confermata dai valori dell'errore relativo percentuale (Figure 2.18b, 2.19b, 2.20b), calcolato utilizzando l'equazione (2.1), che si collocano nell'intervallo $\pm 10\%$.

In particolare, nella prima fase del processo, ovvero quella relativa all'affondamento, si registrano i valori più alti di RE poiché la rete fa un po' più fatica a prevedere l'andamento della curva in questa fase, anche a causa dei diversi meccanismi sopra discussi. La capacità previsionale della rete migliora notevolmente nelle altre due fasi del processo, ciò viene confermato dal fatto che i valori di RE sono compresi nell'intervallo $\pm 5\%$.

In tabella 2.10, invece, vengono riportati i valori dell'errore percentuale assoluto medio per le diverse condizioni di velocità di rotazione (ω) ed avanzamento (v) investigate. Come si può vedere, essi sono caratterizzati da bassi valori, compresi nell'intervallo tra 2,10 e 3,55%. Questo, in altre parole, sta a significare che la rete neurale elaborata ha un'eccellente capacità di generalizzazione.

L'ottima capacità previsionale della rete, infine, viene confermata dall'alto valore del coefficiente di correlazione R, che è risultato essere pari a 0,9928 (Figura 2.21)

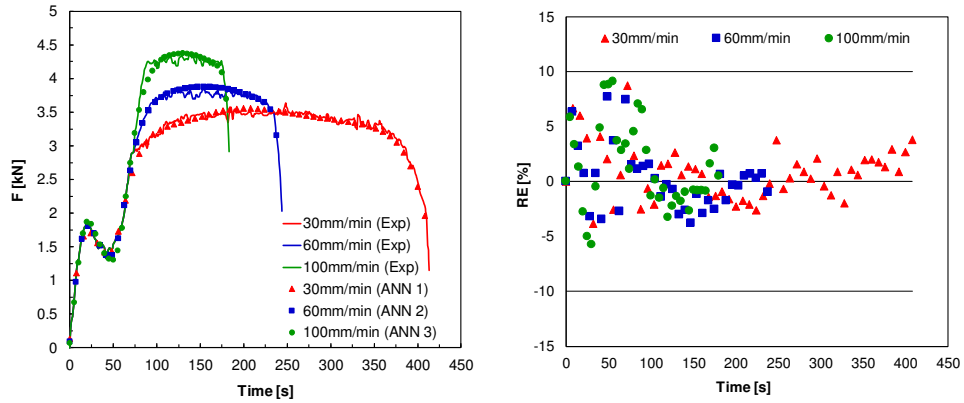


Figura 2.18: (a) Confronto tra le curve sperimentali e quelle previste dalla rete al variare di v ($\omega= 1200$ rpm) e (b) errore relativo

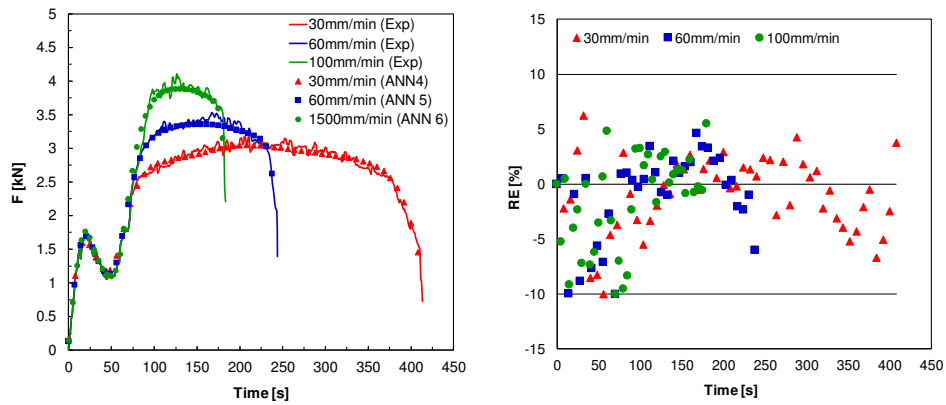


Figura 2.19: (a) Confronto tra le curve F-t sperimentali e quelle previste dalla rete al variare di v ($\omega= 1500$ rpm) e (b) errore relativo

Capitolo 2 Friction Stir Welding

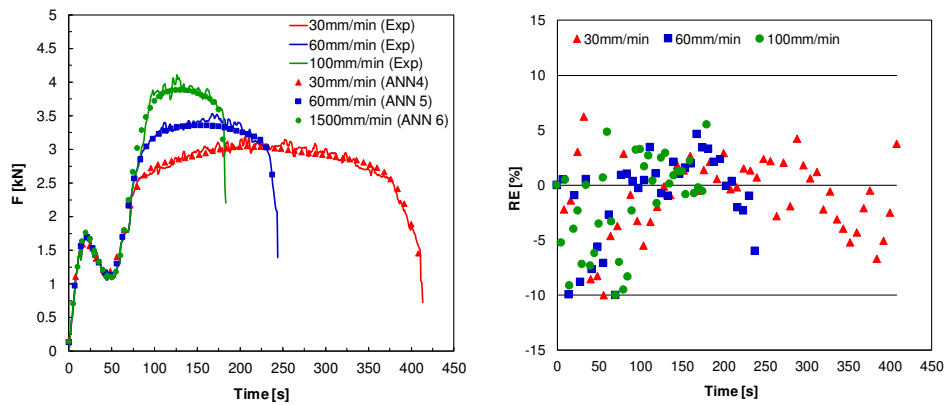


Figura 2.20: (a) Confronto tra le curve F-t sperimentali e quelle previste dalla rete al variare di v ($\omega= 2500$ rpm) e (b) errore relativo

Tabella 2.10: Valori dell'errore percentuale assoluto medio nella previsione delle curve F-T nelle diverse condizioni di processo investigate

ω [rpm]	v [mm/min]	AARE [%]
1200	30	2.12
1200	60	2.10
1200	100	3.17
1500	30	2.88
1500	60	2.86
1500	100	3.55
2500	30	2.79
2500	60	3.39
2500	100	2.96

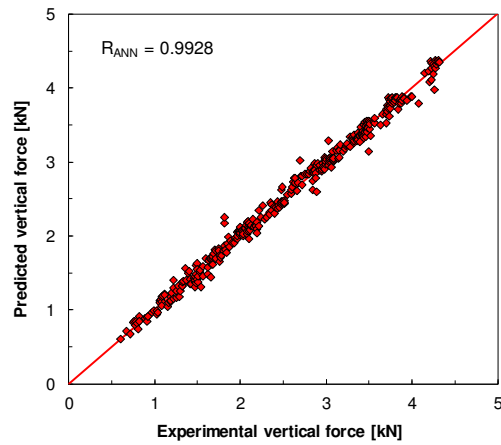


Figura 2.21: Grafico del coefficiente di correlazione

Infine, come già detto, per confermare ulteriormente l'abilità della rete a generalizzare, sono state analizzate 2 condizioni in termini di ω e v , riportate in tabella 2.8, non inserite nel training set. In questo modo, si è voluta testare la capacità della rete di fornire risposte corrette ad input "generici", cioè senza avere la conoscenza dei meccanismi complessi (microstrutturali, meccanici, ecc.) che intervengono durante il processo il processo di Friction Stir Welding. A tal proposito, nelle figure 2.22 ed 2.23 troviamo i risultati ottenuti per le due condizioni investigate:

- i. $\omega = 1350$ giri/min e $v = 80$ mm/min
- ii. $\omega = 1700$ giri/min e $v = 45$ mm/min

Capitolo 2 Friction Stir Welding

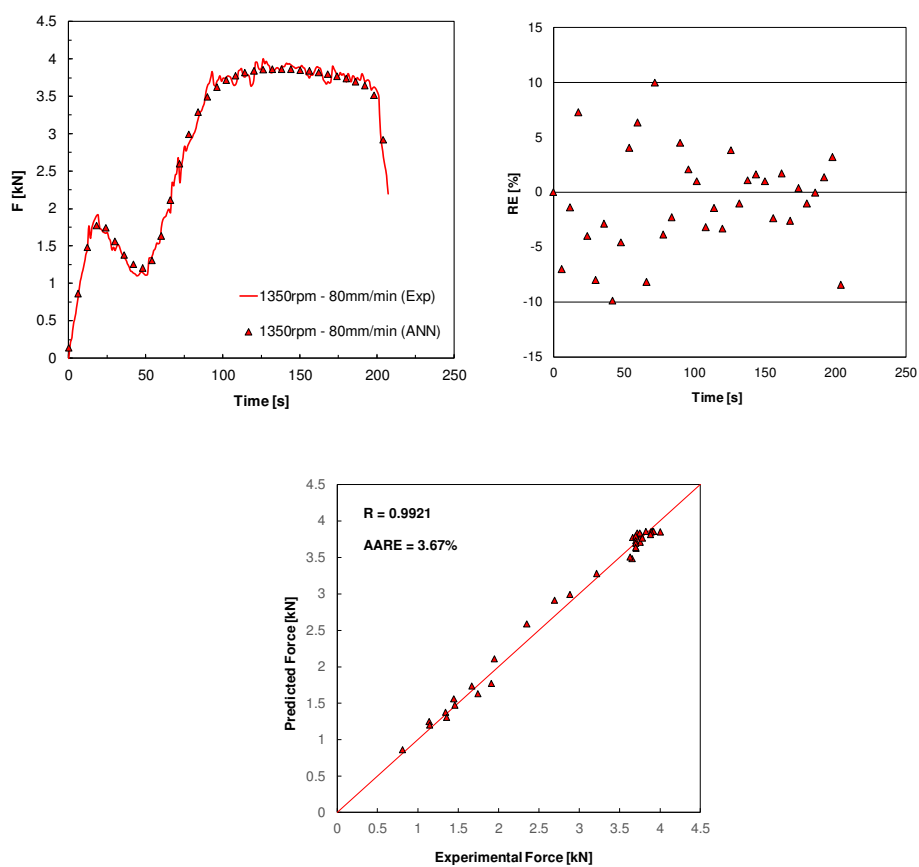


Figura 2.22: (a) Confronto tra le curve F-t sperimentali e quelle previste dalla rete, (b) errore relativo e (c) coefficiente di relazione per la condizione ($\omega = 1350$ rpm, $v = 80$ mm/min)

Capitolo 2 Friction Stir Welding

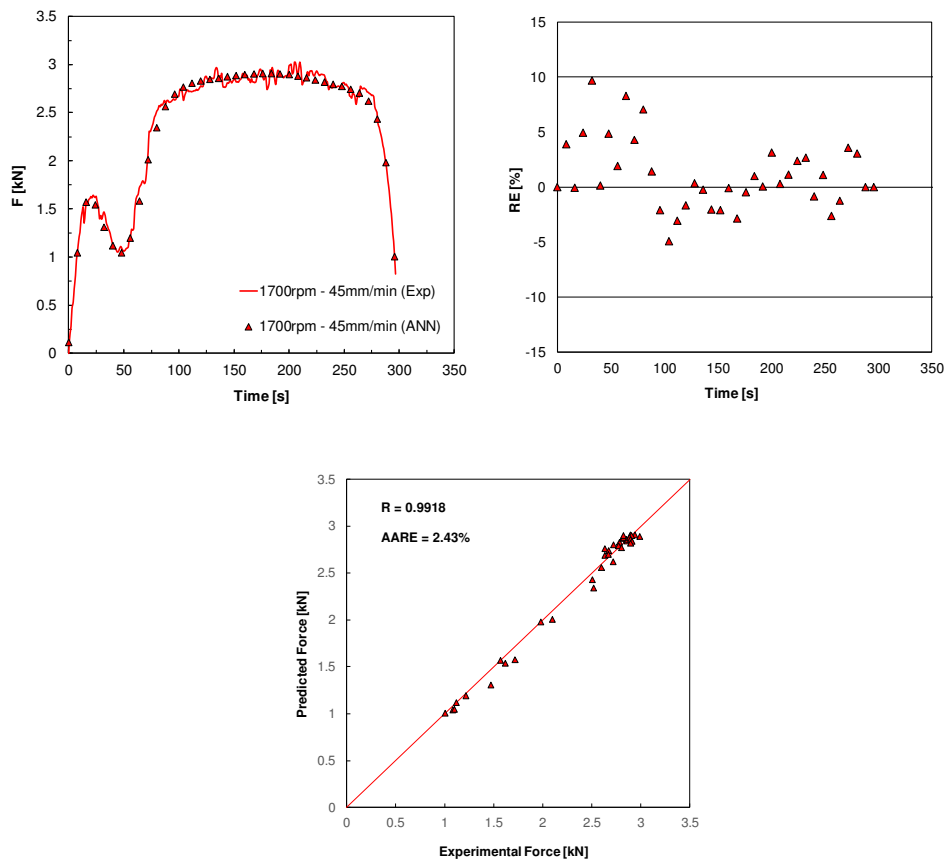


Figura 2.23: (a) Confronto tra le curve F-t sperimentali e quelle previste dalla rete, (b) errore relativo e (c) coefficiente di relazione per la condizione ($\omega = 1700$ rpm, $v = 45$ mm/min)

Anche in questo caso, come si può osservare dalle figure 2.22b e 2.23b, i valori dell'errore relativo percentuale sono compresi nell'intervallo del $\pm 10\%$.

In particolare, come già visto in precedenza, i valori più alti si registrano nella prima fase del processo, ovvero quella relativa all'affondamento dell'utensile. Mentre, nella fase di saldatura l'RE si assesta intorno a valori più bassi, compresi nell'intervallo del $\pm 5\%$. Se, invece, si osservano le figure 2.22c e 2.23c si può notare come i coefficienti di correlazione (R), rispettivamente pari a 0,9921 e 0,9918, siano quindi molto prossimi al valore 1 che rappresenta la massima

Capitolo 2 *Friction Stir Welding*

correlazione tra i valori sperimentali e quelli previsti. Inoltre, in tali figure è riportato anche l'errore percentuale assoluto medio, che risulta essere molto basso in entrambi i casi, nello specifico 3,67% per la condizione con $\omega = 1350$ rpm e $v = 80$ mm/min e 2,43% per la condizione con $\omega = 1700$ rpm e $v = 45$ mm/min.

Questi valori confermano pertanto l'eccellente capacità di generalizzazione del modello sviluppato, poiché esso risulta essere in grado di catturare con elevata precisione l'influenza della velocità di rotazione (ω), di avanzamento (v) ed il loro effetto combinato sulla forma ed i valori della curva F-t.

Capitolo 3

Lavorazioni meccaniche Ecocompatibili

3.1 Premessa

I fluidi da taglio vengono normalmente utilizzati durante le lavorazioni meccaniche con la funzione primaria di raffreddare e lubrificare, riducendo in questo modo l'attrito e la conseguente generazione di calore; ciò permette di ottenere caratteristiche superficiali migliori. Inoltre, l'effetto refrigerante aumenta la durata dell'utensile mantenendo la temperatura al di sotto della temperatura di “softening” termico del materiale e riducendo i fenomeni di usura indotti termicamente (per diffusione ed adesione). Mentre l'effetto lubrificante dei fluidi da taglio riduce l'usura meccanica (abrasione) sul petto del tagliente [61]. I fluidi lubrorefrigeranti sono responsabili, anche, di una varietà di funzioni secondarie, come il trasporto di trucioli e la pulizia degli utensili e del pezzo lavorato.

L'applicazione dei fluidi da taglio convenzionali, tuttavia, crea diversi problemi tecnico ambientali come l'inquinamento a causa della dissociazione chimica dei lubrificanti ad alte temperature di taglio, inquinamento delle acque, contaminazione del suolo durante lo smaltimento e problemi biologici per gli operatori [62,63].

Un altro problema, associato con la loro manutenzione, è la continua crescita di batteri e funghi nel fluido. Questo porta alla riduzione della durata utile dei fluidi da taglio (la presenza di batteri potrebbe ridurre il potere lubrificante e cambiare il pH del fluido, aumentando il rischio di corrosione della macchina utensile) e all'aumento di rischi per la salute umana (la presenza dei batteri non è limitata ai fluidi da taglio, infatti, particolari endotossine sono state rilevate nell'atmosfera di un'officina) [64].

Questo aumenta l'importanza del controllo della crescita batterica nei fluidi utilizzati per la lavorazione dei metalli; tale controllo viene effettuato utilizzando diversi tipi di battericidi, germicidi e umettanti. Ma questi additivi chimici sono catalogati come sostanze pericolose per l'ambiente e la salute dei lavoratori. Molti dei biocidi utilizzabili rilasciano formaldeide che è un potenziale cancerogeno.

L'*International Agency for Research on Cancer* ha dichiarato che l'olio minerale utilizzato nelle lavorazioni meccaniche è cancerogeno e l'esposizione ad esso può causare cancro della pelle [65].

D'altra parte, i biocidi che non rilasciano formaldeide sono molto pericolosi per la salute e altamente corrosivi per la pelle [64]. L'esposizione della pelle ai fluidi da taglio potrebbe anche causare dermatiti. Alcuni tipi di allergeni presenti nei fluidi da taglio provocano dermatiti la cui gravità varia da semplici eruzioni cutanee al cancro maligno [66].

Inoltre, il *National Institute of Occupational Safety and Health* ha stimato che 1,2 milioni di lavoratori in tutto il mondo sono stati esposti agli effetti tossici dei lubrificanti. I fluidi da taglio durante le operazioni di asportazione truciolo

potrebbero vaporizzare e ed essere atomizzati a causa dell'alta pressione e della temperatura elevata, formando una "nebbia". Le particelle sospese nell'aria possono essere facilmente inalate dai lavoratori causando diversi tipi di malattie polmonari. Greaves e i suoi collaboratori [67] hanno dimostrato che bronchite cronica, asma, dolori al torace e irritazione delle vie respiratorie possono essere facilmente legati all'inalazione di sostanze dannose quando si è esposti alle "nebbie" provocate dall'utilizzo del lubrorefrigerante tradizionale.

Un ulteriore svantaggio nell'uso dei lubrorefrigeranti è costituito dalla loro ridotta economicità. A seconda del pezzo e le condizioni di produzione i costi connessi all'uso di lubrorefrigeranti vanno dal 7 al 17% dei costi totali del pezzo fabbricato [68]; nella lavorazione di materiali "difficili da lavorare" si raggiunge il 20-30% [69]. Se si effettua un confronto, questo è molto più alto rispetto al costo per gli utensili, corrispondente al 2-4% del costo di produzione totale [68]. Quando si effettua un'analisi economica e si confrontano i diversi processi di lavorazione vanno presi in considerazione anche i costi di acquisizione, di manutenzione e di smaltimento dei fluidi da taglio. I costi di smaltimento possono essere fino a quattro volte maggiori rispetto al loro prezzo di acquisto [66]. Ciò è dovuto principalmente al fatto che la maggior parte dei fluidi da taglio non sono naturalmente biodegradabili e richiedono trattamenti costosi prima dello smaltimento. Inoltre, la maggior parte dei prodotti lavorati sono spesso contaminati e vengono smaltiti senza trattamenti adeguati.

L'introduzione di normative atte a tutelare l'ambiente, la crescente consapevolezza sui problemi relativi alla salute umana e ai costi di produzione, la scelta dei consumatori verso i prodotti rispettosi dell'ambiente ha messo sotto pressione le industrie che realizzano processi di lavorazione meccanica, spingendole a ridurre al minimo l'impiego dei liquidi lubrorefrigeranti tradizionali.

Nasce, perciò, la necessità, di focalizzare l'attenzione su diverse strategie di lavorazione ecocompatibili per rispondere alle crescenti pressioni verso la

sostenibilità. Queste strategie includono tecniche di lubrificazione non tradizionali, come la lavorazione a secco o con quantità minima di lubrorefrigerante (MQL) per ridurre il consumo di olio, acqua ed energia.

Il *wet cut* migliora le prestazioni di taglio, ma ha effetti negativi su energia e ambiente [70]; mentre strategie come il *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) rappresentano una via di mezzo. A tal riguardo, Bruni et al. [71-73] hanno investigato gli effetti delle tre diverse condizioni di taglio (Dry, MQL e Wet) sull'usura dell'utensile e sulla rugosità in lavorazioni per asportazione di truciolo di finitura.

In alcuni casi, però, l'abolizione totale del lubrorefrigerante è altamente penalizzante in termini di durate anche in presenza di rivestimenti; infatti, la loro durezza a caldo, pur rimanendo elevata, diminuisce con la temperatura e, nelle lavorazioni di materiali particolarmente abrasivi questo decremento può essere tale da influire significativamente sulla vita utile dell'utensile.

Alcuni studi [74-75] hanno dimostrato che scegliendo in modo più razionale le fasi del processo produttivo, attraverso una riduzione delle lavorazioni per asportazione di truciolo, è possibile ottenere grandi benefici dal punto di vista economico ed ambientale. Uno dei possibili modi per raggiungere tale obiettivo prevede l'introduzione di un'operazione preliminare di deformazione plastica a freddo [76].

A tal riguardo, una delle più diffuse è sicuramente lo stampaggio. I pezzi stampati sono generalmente caratterizzati da proprietà meccaniche superiori in quanto si raggiungono elevati valori di resistenza e di tenacità, un andamento costante delle fibre (a differenza per esempio dei processi per asportazione di truciolo) e una buona finitura superficiale accompagnata da bassi valori delle tolleranze dimensionali.

Per quanto riguarda l'aspetto economico, si possono avere risparmi notevoli dovuti a diversi aspetti come:

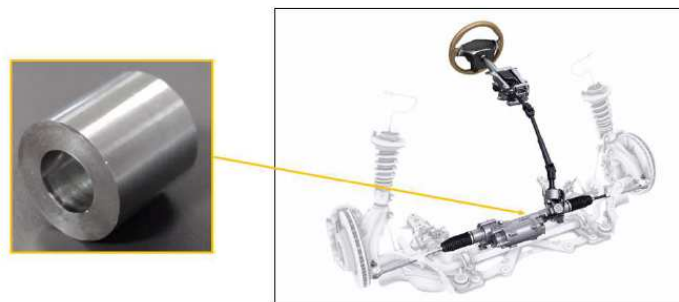
- Bassa quantità di materiale di partenza: il volume di materiale iniziale viene quasi completamente convertito in prodotto finito, senza spreco di materiale. Se confrontato con i processi per asportazione, il risparmio che ne deriva può essere quantificato nel 70% di materiale di scarto in meno.
- Uso di materia prima a basso costo: durante la formatura a freddo si ha l'incrudimento del pezzo e quindi un aumento delle caratteristiche di resistenza del materiale; ciò consente l'impiego di materiali di partenza meno pregiati, garantendo le medesime.
- Alta produttività: per piccoli pezzi, ricavati da filo, si utilizzano macchine per lo stampaggio orizzontali, che raggiungono una cadenza produttiva di 200 pz/min. Per i pezzi più grandi si utilizzano presse verticali che raggiungono velocità di produzione di 50 pz/min.
- Riduzione o eliminazione della fase successiva di machining (prodotto Near Net Shape)
- Facilità di integrazione di diverse funzioni e geometrie su un singolo pezzo: i componenti ottenuti per stampaggio a freddo offrono una valida opportunità per il "re-engineering" per produrre pezzi a basso costo.

Alla luce di tutto ciò, il presente studio, nato dalla collaborazione con il Gruppo Zannini S.p.A, vuole investigare dal punto di vista tecnologico la lavorabilità alle macchine utensili di componenti in acciaio, senza fluido lubrorefrigerante e che hanno subito un processo preliminare di stampaggio freddo. Tale processo quindi sarà confrontato con quello "tradizionale" di tornitura cilindrica da barra in termini di usura utensile, finitura superficiale e precisione dimensionale.

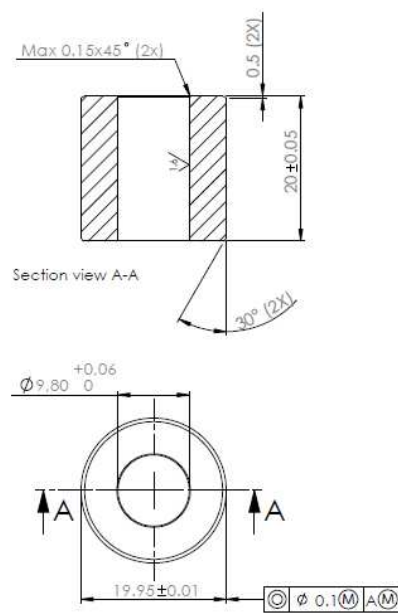
Pertanto per realizzare tale confronto sono state eseguite due campagne prove di tornitura interna con gli stessi utensili e medesime condizioni di taglio.

3.2 Procedure sperimentali

Il presente studio è incentrato su un componente assialsimmetrico destinato al settore automotive, nello specifico una boccola che va installata nella scatola dello sterzo (figura 3.1)



(a)



(b)

Figura 3.1: Boccola oggetto dello studio: (a) applicazione e (b) dimensioni

Capitolo 3 Lavorazioni meccaniche Ecocompatibili

Il materiale utilizzato per la sua realizzazione è un acciaio C15 E4 (ISO), la cui composizione chimica è riportata in tabella 3.1.

Tabella 3.1 Composizione percentuale acciaio C15

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Pb	Al	Cu
0,17	0,59	0,19	0,027	0,008	0,13	0,10	0,01	0,17	0,023	0,19

Rispetto al normale C15 questo acciaio ha come elemento alligante il piombo in una percentuale pari allo 0,17% in peso con l'obiettivo di migliorarne la lavorabilità alle macchine utensili. In quanto il piombo esercita un'azione di lubrificazione solida, riduce il coefficiente d'attrito fra utensile e truciolo e la formazione del tagliante di riporto, permettendo così lavorazioni a più alta produttività.

Allo stesso tempo il piombo non è considerato un vero e proprio elemento di lega in quanto essendo insolubile nel ferro tende ad associarsi alle inclusioni non metalliche presenti nell'acciaio, in questo modo le caratteristiche meccaniche dell'acciaio, rimangono invariate [77]. Per tali motivi il presente acciaio si presta molto bene sia per le lavorazioni per deformazione plastica a freddo che per quelle per asportazione di truciolo.

3.2.1 Stampaggio a freddo

Per l'operazione dello stampaggio a freddo è stata utilizzato il processo di estrusione a doppia coppa, comunemente abbreviato DCE (*Double Cup Extrusion*). La DCE consiste in un processo simultaneo di estrusione diretta ed inversa, che determina sul provino cilindrico la formazione di due coppe di altezza diversa, proprio per la differente azione dell'attrito nella parte inferiore e superiore del provino (figura 3.2).

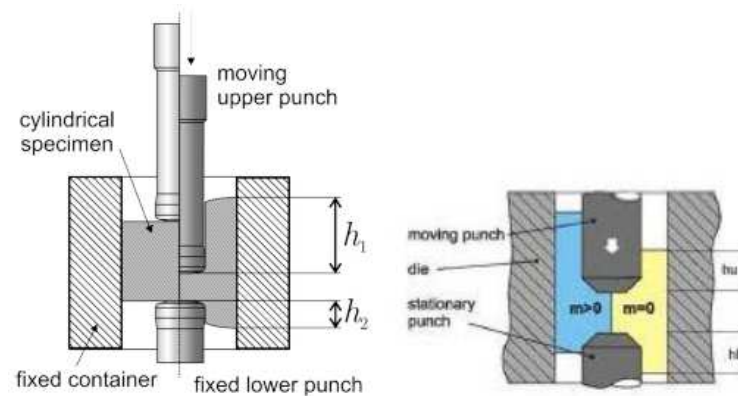


Figura 3.2: Processo di DCE

Per la severa deformazione plastica impartita e per la forte espansione superficiale, tale processo riproduce accuratamente i meccanismi che sono alla base dei comuni processi di stampaggio a freddo [78]

Per la campagna di prove è stata utilizzata una macchina servoidraulica MTS 810 System con cella di carico da 250 kN, appositamente equipaggiata con un'attrezzatura appositamente sviluppata (figura 3.3).



Figura 3.3: Attrezzatura utilizzata per processo di DCE

La scelta delle condizioni di prova, in termini di corsa e velocità di avanzamento del punzone, è avvenuta in accordo con i risultati di simulazioni numeriche, realizzate preliminarmente con il software agli elementi finiti DEFORM-3D. Quindi, le prove sono state eseguite con una velocità di avanzamento del punzone pari a 0,15 mm/s ed una corsa pari a 12 mm. In figura 3.4 è mostrato la forma sbazzata ottenuta dal processo di DCE.



Figura 3.4: Forma componente stampato a freddo

3.2.2 Prove di tornitura

Le operazioni di tornitura sono state eseguite con un tornio INDEX ABC (figura 3.5), equipaggiato con un sistema di controllo numerico computerizzato (CNC) Sinumerik 840C prodotto dalla SIEMENS.



Figura 3.5: Tornio INDEX ABC utilizzato per le prove di tornitura

L'inserto oggetto della sperimentazione è codificato come CCGT0301 ed è realizzato dalla KYOCERA (figura 3.6). Esso è realizzato in metallo duro (carburi di tungsteno, cobalto e tantalio) ricoperto da uno strato di TiCN (carbonitruro di titanio), a grana fine, con struttura colonnare che è dura e resistente all'usura abrasiva.

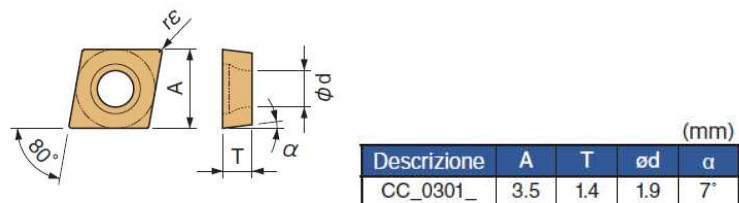


Figura 3.6: Inserto utilizzato

Lo stelo porta-inserto è codificato come C04G-SCLCL03 ed è anch'esso realizzato dalla KYOCERA. Per quanto riguarda i parametri di taglio (velocità di taglio, avanzamento per giro e profondità di passata) sono stati scelti in accordo con le raccomandazioni fornite dal costruttore:

- $V_c = 100$ mm/min
- $f = 0,03$ mm/giro

- $a_p = 0,4 \text{ mm}$

Poiché, naturalmente, si partiva da due geometrie diverse, cioè un tondo pieno da un lato (figura 3.7a) mentre dall'altro da uno sbizzato (3.7b), il ciclo di lavorazione della prima geometria comprendeva più operazioni di machining preliminari; in particolare, delle operazioni di foratura. Mentre la fase di tornitura interna, in termini di tempo di contatto utensile, era identica nei due casi, in modo da realizzare un confronto diretto per quanto riguarda l'usura.

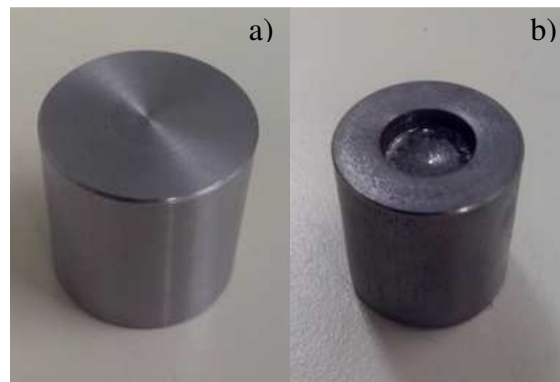


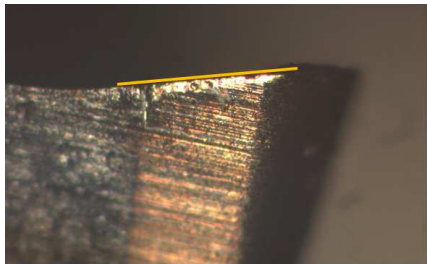
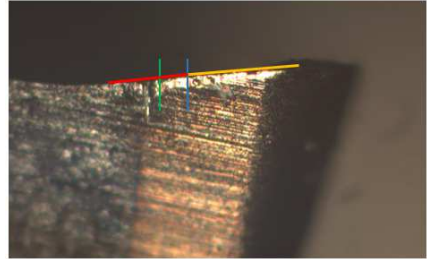
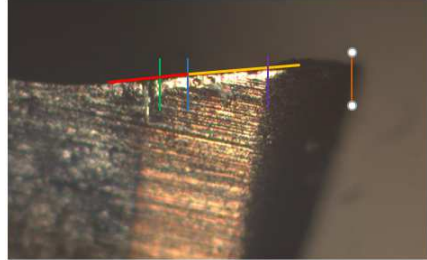
Figura 3.7: (a) Tondo pieno e (b) componente sbizzato utilizzati per la sperimentazione

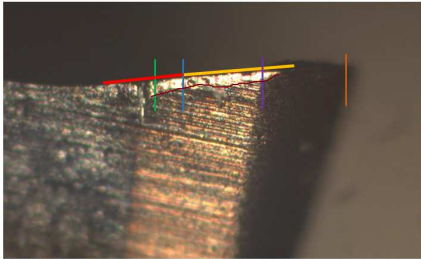
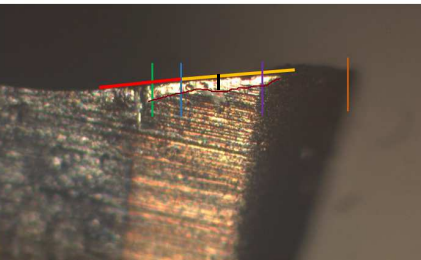
La rilevazione dell'usura ha seguito la norma ISO 3685:1993 (*Tool-life testing with single-point turning tools*) che stabilisce che può essere preso come criterio di fine vita degli utensili quando la rugosità superficiale Ra raggiunge un determinato valore. Tra quelli indicati dalla norma si è scelto $Ra = 1,6 \mu\text{m}$ poiché è il valore limite che attualmente l'azienda deve rispettare su questo tipo di componenti, per poter essere accettati dal cliente finale. Alla fine di ogni intervallo di lavorazione (circa 4 min) è stata valutata l'usura dell'inserto attraverso la misurazione del labbro d'usura sul fianco, mentre la rugosità superficiale della superficie lavorata, fattore che sarà direttamente collegato con lo stato dell'utensile, è stata valutata ogni circa 2 minuti, corrispondenti a 5 provini lavorati.

Capitolo 3 Lavorazioni meccaniche Ecocompatibili

Per la rilevazione dell'usura è stato utilizzato un microscopio ottico Reichert-Jung, modello MeF3. La misura dei valori di VB e VB_{MAX} sulle immagini rilevate con il microscopio è stata effettuata utilizzando strumenti software che ci permettessero l'elaborazione grafica delle immagini. In accordo con la ISO 3685:1993, si riporta nella tabella 3.2 la procedura dettagliata seguita.

Tabella 3.2: Procedura per quantificare il VB secondo la norma ISO 3685:1993

<p>Ricostruzione del bordo originale dell'inserto. Usando il bordo non usurato è stato possibile ricostruire il profilo dell'inserto (segmento giallo).</p>	
<p>Esclusione dell'intaglio ai fini della misura nella zona centrale del bordo usurato. Misura della lunghezza totale (segmento giallo). Eliminazione del primo quarto della lunghezza totale (segmento rosso compreso tra i due segmenti verticali azzurro e verde).</p>	
<p>Esclusione del tratto curvilineo dell'inserto (zona compresa tra segmento verticale marrone e il segmento verticale violetto).</p>	

<p>Misura dell'area centrale della zona usurata (compresa tra segmento verticale violetto e segmento verticale blu).</p> <p>Misura della distanza tra i due segmenti verticali (violetto e blu).</p> <p>Determinazione del VB medio come rapporto tra area e distanza.</p>	 A microscopic image of a worn surface. A red line is drawn along the top edge of the wear zone. Two vertical lines, one purple and one blue, are drawn to measure the width of the central wear zone. A yellow line is also visible, likely representing the average wear depth.
<p>Misura del valore di VB_{MAX} all'interno della zona usurata (segmento verticale nero).</p>	 A microscopic image of a worn surface, similar to the one above. In addition to the red, purple, blue, and yellow lines, a black vertical line is drawn to measure the maximum wear depth (VB_{MAX}) within the wear zone.

Le misure di rugosità superficiale sono state effettuate con un rugosimetro Mitutoyo modello SV-3000 (figura 3.8), mentre per il controllo delle tolleranze dimensionali e di forma delle superfici lavorate è stato utilizzato un rotondimetro Mitutoyo modello RA-2200 (figura 3.9).

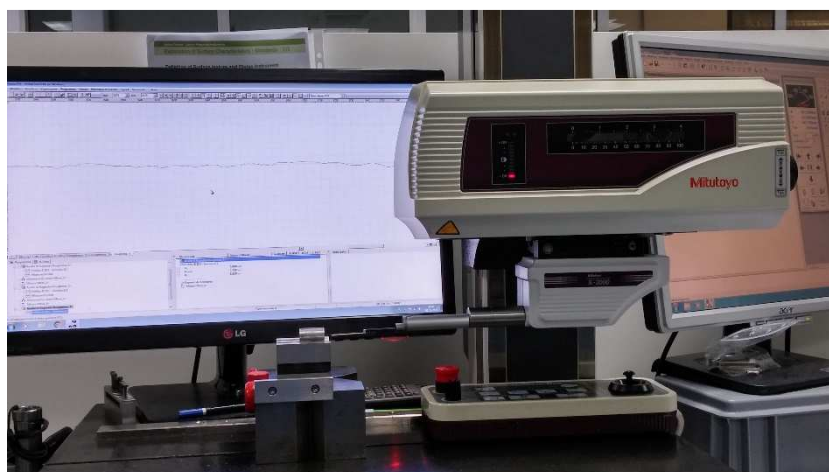


Figura 3.8: Rugosimetro Mitutoyo modello SV-3000



Figura 3.9: Rotondimetro Mitutoyo modello RA-2200

3.3 Risultati sperimentali e discussione

Di seguito vengono riportati i risultati principali della campagna di prove di tornitura interna eseguita senza fluido lubrorefrigerante.

In figura 3.10 sono confrontate le curve di usura delle prove eseguite nelle due condizioni investigate. Si può notare come la durata maggiore del tagliente, anche se di poco, la si ottiene nella lavorazione del materiale che ha subito una lavorazione a freddo preliminare.

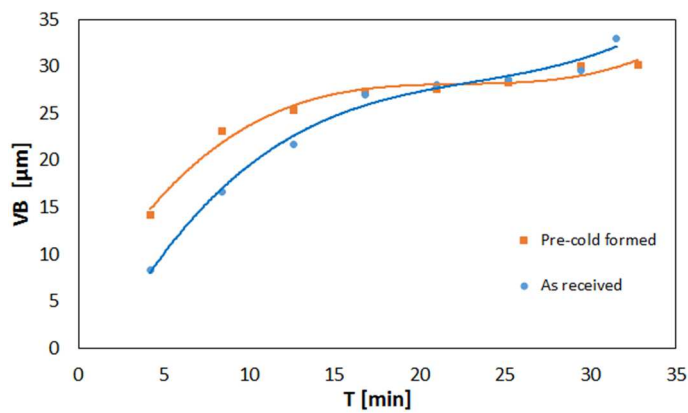


Figura 3.10: Andamento di VB in funzione del tempo di lavorazione

In figura 3.11 viene riportato l'andamento di Ra in funzione del tempo di lavorazione. In particolare si può notare un andamento a S concorde all'andamento di VB mostrato in figura 3.10, prova che la rugosità superfice della superfice lavorata è strettamente correlata all'usura dell'inserto. Si possono distinguere principalmente tre zone: la prima caratterizzata da un rapido aumento di Ra, una seconda dove il valore di rugosità si stabilizza ed infine un ultimo tratto dove Ra cresce rapidamente fino raggiungere il valore limite che abbiamo imposto, ovvero $Ra = 1,6\mu\text{m}$. In realtà, nella seconda zona la rugosità del componente stampato a freddo non è perfettamente costante, ma subisce una leggera diminuzione per poi riprendere a crescere fino al limite prestabilito di $1,6\mu\text{m}$. Questo comportamento, riscontrato anche da Pavel et. al [79] sulla tornitura di pezzi temprati (Hard turning), è dovuto ad un arrotondamento degli spigoli del tagliente.

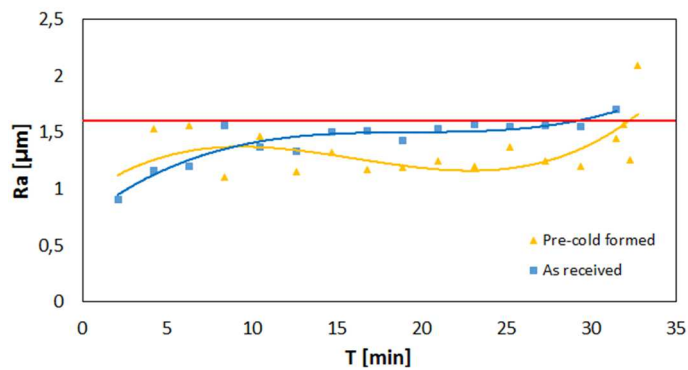


Figura 3.11: Andamento di Ra in funzione del tempo di lavorazione

Poiché la presenza del labbro di usura sul raccordo tra i taglienti tende a generare un diametro tornito minore e non costante rispetto a quello di un utensile nuovo, è importante tenere sotto controllo anche i valori delle tolleranze dimensionali, soprattutto quando si tratta di componenti destinati al settore automotive dove le tolleranze sono più ristrette. A tal proposito, in figura 3.12 vengono riportati i risultati delle misure della tolleranza di cilindricità eseguite sul diametro della superficie lavorata. Anche in questo caso si può notare un andamento concorde con quello del VB mostrato in figura 3.8. In particolare, il componente stampato a freddo sembra offrire una miglior precisione dimensionale, fino a quando si giunge nella condizione di massima usura rilevata, in corrispondenza della quale si ha un peggioramento sostanziale.

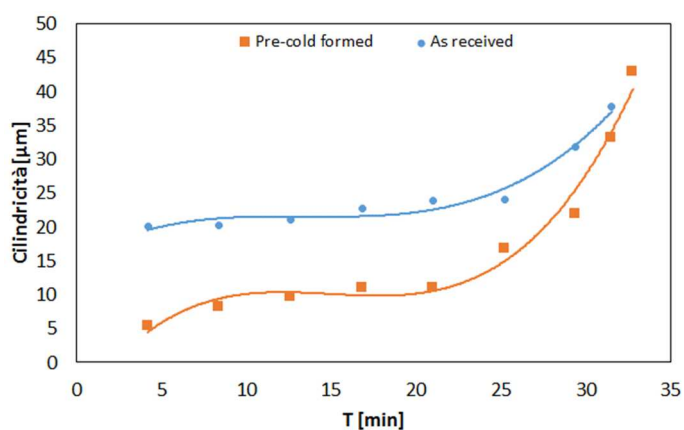


Figura 3.12: Andamento della cilindricità in funzione del tempo di lavorazione

Infine, in figura 3.13 viene mostrata la morfologia e la quantità di truciolo prodotta nei due casi per realizzare il componente oggetto dello studio. Nella condizione di lavorazione da pieno, chiaramente, è compreso anche il truciolo derivante dalle operazioni di foratura.

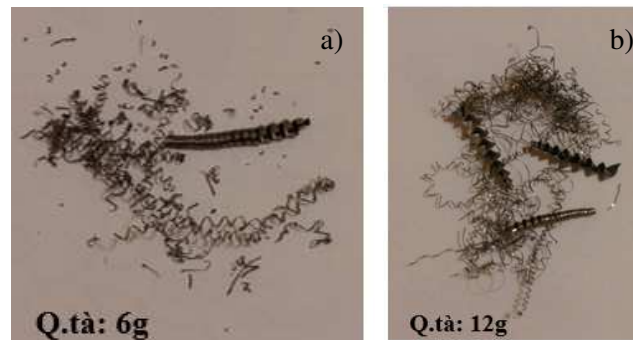


Figura 3.13: Quantità di truciolo prodotta nei due casi: a) tornitura di finitura su componente preliminarmente deformato a freddo; b) tornitura da barra.

Come si può vedere, la quantità di truciolo prodotta nel caso della lavorazione, partendo dalla geometria che ha subito una lavorazione preliminare di stampaggio a freddo, è la metà di quella prodotta con il processo tradizionale di tornitura da barra.

Capitolo 4

Materiali ecoinnovativi: Analisi del processo di Foratura di stacks ibridi CFRP/Alluminio

4.1 Premessa

Negli ultimi anni sta trovando sempre maggiore spazio l'utilizzo di strutture composite sandwich come elementi strutturali, in particolar modo per applicazioni aerospaziali soggette a elevati carichi di servizio.

Una struttura sandwich è costituita da un'anima centrale detta *core* e da due facce esterne dette *skin*. Gli *skins* sono generalmente costituite da laminati fibrorinforzati e sono responsabili delle proprietà meccaniche del materiale. Il *core* deve essere un materiale a bassa densità tale da garantire una certa leggerezza al materiale ed ha il compito di tenere insieme gli *skins* e trasferire ad essi i carichi. Pertanto, a partire dalle elevate prestazioni, in termini di efficienza strutturale (E/ρ) dei materiali compositi si è pensato di affiancare a questi ultimi materiali metallici, quali appunto Alluminio e Titanio.

In contrapposizione a tutti questi vantaggi c'è un costo di produzione elevato, dovuto soprattutto all'assemblaggio strutturale. L'assemblaggio delle diverse parti avviene principalmente tramite collegamenti meccanici, il cui impiego garantisce lo smontaggio necessario alla spedizione, il controllo, la riparazione, la sostituzione. Per tale motivo, si fa largo uso di operazioni di foratura con lo scopo di creare alloggi per giunzioni come bullonature, chiodature, ecc.

Il numero dei fasteners in un tipico aereo militare può variare da 200.000 a 300.000 elementi, mentre in un aereo di linea da 1.500.000 a 3.000.000.

Allo stesso tempo, la foratura dei materiali compositi è un fenomeno notevolmente complesso, poiché legato alla natura disomogenea e al comportamento anisotropo che contraddistingue queste classi di materiali, caratteristiche che possono portare a delaminazioni e rottura delle fibre, con conseguente riduzione della resistenza e dell'integrità strutturale della giunzione, nonché al mancato rispetto delle strette tolleranze imposte dal settore aeronautico.

Di conseguenza, si capisce come il processo di foratura diventi una delle attività predominanti dell'intero processo di assemblaggio in campo aeronautico.

Tutto ciò giustifica il forte interesse del settore aeronautico nella ricerca volta alla caratterizzazione e alla ottimizzazione degli utensili, in particolar modo nell'ambito del processo di foratura, al fine di definire materiali e geometrie degli utensili in grado di aumentarne la vita utile riducendo allo stesso tempo i costi.

Sotto il punto di vista tecnologico, durante il processo di foratura nascono due aliquote di forza: la forza di penetrazione (spinta) e la coppia. La spinta, che agisce lungo l'asse della punta, è la forza necessaria per mantenere una data velocità di avanzamento nel materiale. Queste grandezza è influenzata dai parametri di taglio (velocità, avanzamento, geometria e materiale della punta, materiale del pezzo da lavorare, ecc.) e a loro volta influenza la riuscita dell'operazione di foratura: una sua variazione comporta infatti differenti livelli di usura dell'utensile, e quindi, una differente qualità del foro ottenuto, in termini

di rugosità superficiale e rispetto delle specifiche geometriche e dimensionali. Quindi, l'economia delle lavorazioni per asportazione di truciolo è notevolmente influenzata dall'usura progressiva dell'utensile che condiziona la durata del tagliente e agisce sensibilmente su alcune grandezze caratteristiche della lavorazione. Infatti, come si può facilmente intuire, col progredire dell'usura si ha, in generale, un peggioramento della finitura superficiale, variazioni dimensionali dei fori, incremento delle forze di taglio e quindi della potenza assorbita dalla macchina per avanzare nella lavorazione del pezzo.

In letteratura numerosi contributi [80-87] analizzano il processo di foratura: nella maggior parte di questi i parametri variabili sono il materiale lavorato (GFRP e principalmente CFRP) il materiale dell'utensile (HSS, carburi, PCD), la geometria dell'utensile, la velocità di taglio e l'avanzamento. Per il controllo del processo vengono utilizzate misure della forza di penetrazione e della coppia di taglio, della delaminazione e dell'usura utensile.

Questa grande varietà di variabili in gioco rende il processo di foratura tutt'oggi una delle sfide principali nel panorama ingegneristico.

Il presente studio ha avuto come obiettivo l'analisi del processo di foratura su stack ibridi, formati da un core in lega di alluminio AA7075 e due facce in materiale composito rinforzato con fibra di carbonio. A tal riguardo, sono state analizzate due punte elicoidali caratterizzate da diversi rivestimenti e geometrie. Nello specifico, è stato fatto uno studio approfondito in termini di usura, forza assiale di spinta e qualità dei fori realizzati. Quest'ultima valutata attraverso il fattore di delaminazione e la tolleranza dimensionale del foro.

Infine, si è provveduto a definire una relazione sistematica tra l'usura utensile e le altre grandezze (forza assiale, fattore di delaminazione e dimensione dei fori). Come già detto, l'usura degli utensili rappresenta, sicuramente, il problema più importante nelle lavorazioni per asportazione di truciolo, pertanto effettuare uno studio approfondito su di essa può risultare utile per aumentare le prestazioni

dell'utensile in termini di vita utile (durata). Di conseguenza, ottimizzando la vita dell'utensile è possibile migliorare la sostenibilità del processo [88].

Gli utensili da taglio solitamente sono costruiti in metallo duro che è formato da carburo di tungsteno e cobalto. Kieffer e Lassner [89], hanno mostrato che tra il 1955 e 1991 è stato estratto circa il 60% del tungsteno presente sulla Terra e, poiché, si tratta di un metallo raro e fisicamente limitato, tale dato è assolutamente preoccupante. In particolare, le riserve stimate di tungsteno sono circa 7 milioni di tonnellate, equivalenti a 100 anni di consumo.

Molti costruttori di utensili si stanno adoperando per riciclare gli utensili a fine vita. Il processo di riciclaggio comporta però, allo stesso tempo, dei consumi energetici non trascurabili; infatti per riciclare 1Kg di materiale sono necessari 4kWh. Alla luce di tutto ciò, aumentare la durata degli utensili da taglio rappresenta sicuramente la soluzione che permette di realizzare un considerevole risparmio di risorse ed energia, e di conseguenza di emissioni di CO₂.

4.2 Procedure sperimentali

Come descritto precedentemente i compositi sandwich sono costituiti da due "pelli esterne" dette skin e da un core interno. In questo studio lo skin è costituito da composito multi-ply fibro-rinforzato con fibre di carbonio (CFRP), mentre il core interno da una piastra in lega di alluminio 7075 (Figura 4.1).

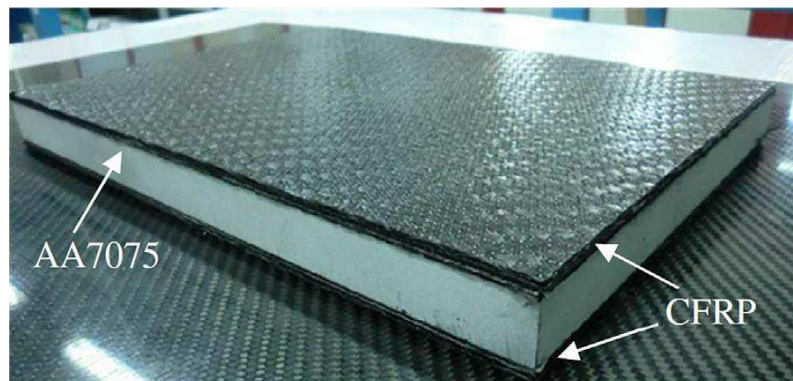


Figura 4.1: Stack utilizzato per le prove di foratura

Per realizzare le operazioni di foratura è stato utilizzato un centro di lavoro a controllo numerico computerizzato (CNC) a 5 assi della JOMACH modello 141. La campagna sperimentale ha interessato 2 geometrie di utensili a doppia elica con diametro nominale di 6,8 mm. Entrambi gli utensili erano in metallo duro integrale ma con due diversi rivestimenti. La prima punta elicoidale presentava un rivestimento in DLC (*Diamond Like Carbon*) mentre la seconda era rivestita in nitruro di titanio e alluminio (TiAlN).

Il Diamond Like Carbon è una forma di carbonio amorfo (non cristallino) dotato di un'elevata durezza (1000~8000 HV) e basso coefficiente di attrito. Esso è ottenibile solo come film sottile e viene utilizzato nell'ambito dei rivestimenti sottili per le sue eccezionali proprietà.

Nelle tabelle 4.1 e 4.2 vengono riportate rispettivamente le caratteristiche geometriche ed i parametri di taglio dei due utensili oggetti dello studio.

Tabella 4.1: Caratteristiche geometriche delle due punte utilizzate per gli esperimenti

Rivestimento	Diametro nominale [mm]	Lunghezza elica [mm]	Angolo di punta [°]
DLC	6.8	45	118
TiAlN	6.8	43	140

Tabella 4.2: Parametri di taglio utilizzati per gli esperimenti

Rivestimento	Velocità di taglio [m/min]	Velocità di rotazione [giri/min]	Velocità di avanzamento [mm/min]	Avanzamento per giro [mm/giro]
DLC	170.8	8000	1300	0.2
TiAlN	128	6000	1200	0.163

Fissati i parametri di taglio, sono stati realizzati in successione 170 fori con ciascun utensile, con interruzioni ad intervalli regolari per analizzare il grado di usura. L'acquisizione della forza verticale è avvenuta nei fori realizzati al centro dello stack, come mostrato dallo schema in figura 4.2; tale scelta è stata dettata dalla disposizione delle celle di carico sulla piastra dinamometrica.

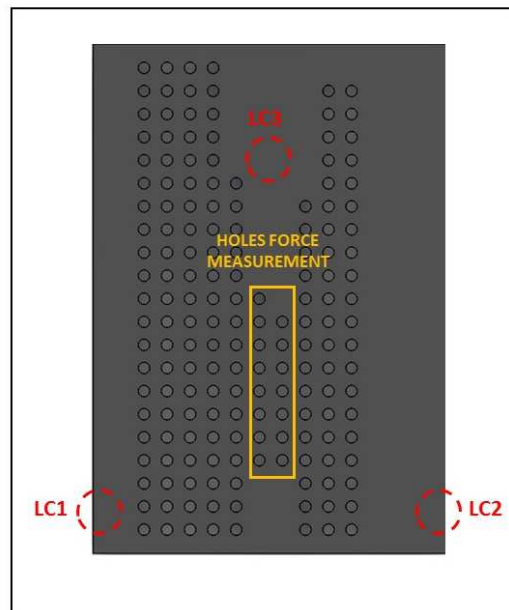


Figura 4.2: Schema di foratura e zona in cui è stata misurata la forza verticale

Per osservare e quantificare lo stato di avanzamento dell'usura è stato utilizzato uno stereomicroscopio della LEICA modello EZ4D.

Per la misura della forza assiale di spinta generata durante il processo di foratura è stata utilizzata l'attrezzatura rappresentata in figura 4.3 e precedentemente descritta nel paragrafo 2.2.1.

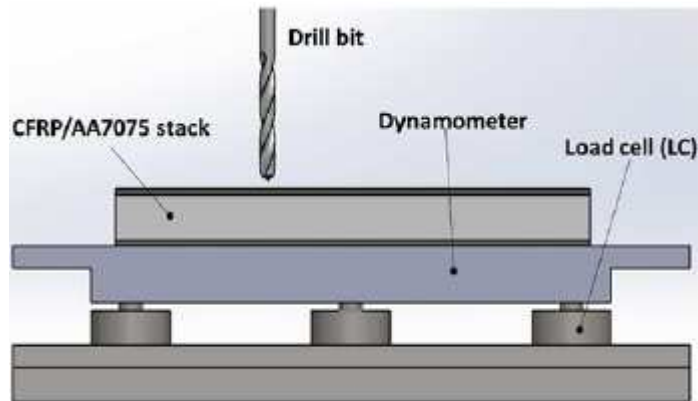


Figura 4.3: Assieme piastra dinamometrica-stack

Una macchina di misura a coordinate (CMM) della OGP, modello SmartScope ZIP300, è stata impiegata invece per la valutazione della delaminazione ed il diametro dei fori. Tale macchina è equipaggiata rispettivamente: da un sistema ottico con un rapporto di ingrandimenti pari a 7:1 per realizzare misure non a contatto e con un sistema di tastatori a contatto per eseguire misure più precise. Nel caso della delaminazione, sono state acquisite prima le immagini attraverso il sistema ottico in dotazione alla macchina CMM. Queste poi sono state elaborate attraverso il software LASEZ per quantificare la delaminazione sui fori. Un indice comunemente utilizzato per la misura della delaminazione è il DF (delamination factor). Per il calcolo del fattore del DF è stata utilizzata la seguente equazione, proposta da Faraz et al [90] e Sanda et al. [91]:

$$DF [\%] = \frac{A_{del} - A_{nom}}{A_{nom}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Dove:

- A_{del} : Area di delaminazione
- A_{nom} : Area nominale

A tal proposito, in figura 4.4 è possibile osservare la delaminazione superficiale di un foro e, quindi, l'area nominale (linea di colore bianco) e quella di delaminazione (linea di colore rosso).

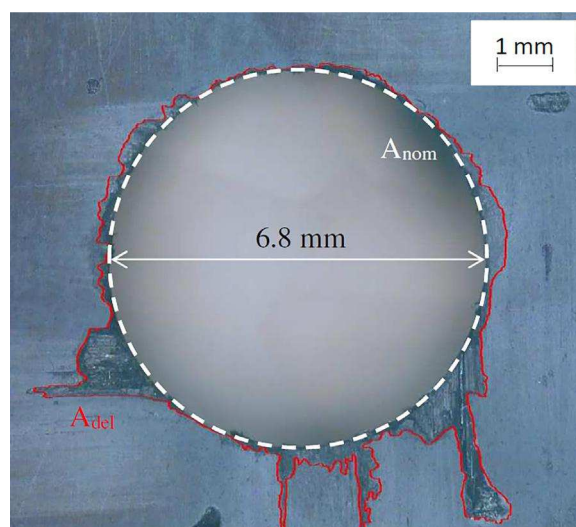


Figura 4.4: Quantificazione della delaminazione

Per quanto riguarda la misura del diametro dei fori invece è stato utilizzato il sistema con tastatore a contatto con diametro di sfera e punta pari a 3 mm (Figura 4.5).

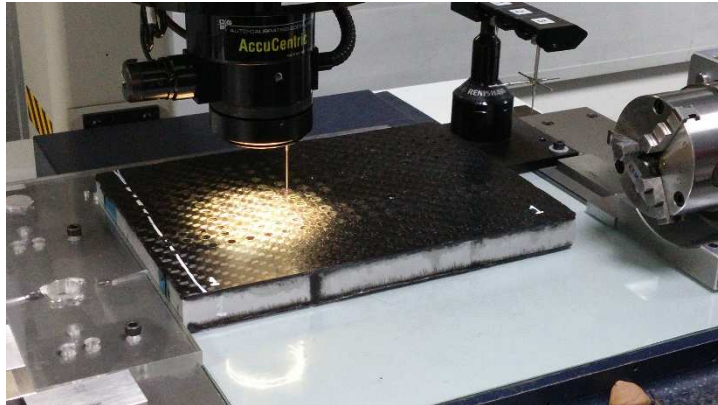


Figura 4.5: Sistema con tastatore a contatto della macchina CMM per la misura del diametro dei fori

4.3 Risultati sperimentali e discussione

Nella foratura dei materiali compositi rinforzati con fibre di carbonio (CFRP) la principale causa dell'usura degli utensili è totalmente imputabile all'azione abrasiva delle fibre vista la limitata resistenza meccanica della matrice [80,83]. Le aree maggiormente interessate da tali fenomeni sono soprattutto il fianco e lo spigolo. In virtù di ciò, nel presente studio si è ritenuto interessante quantificare il labbro di usura (VB) che si manifesta sul fianco del tagliente (figura 4.6).

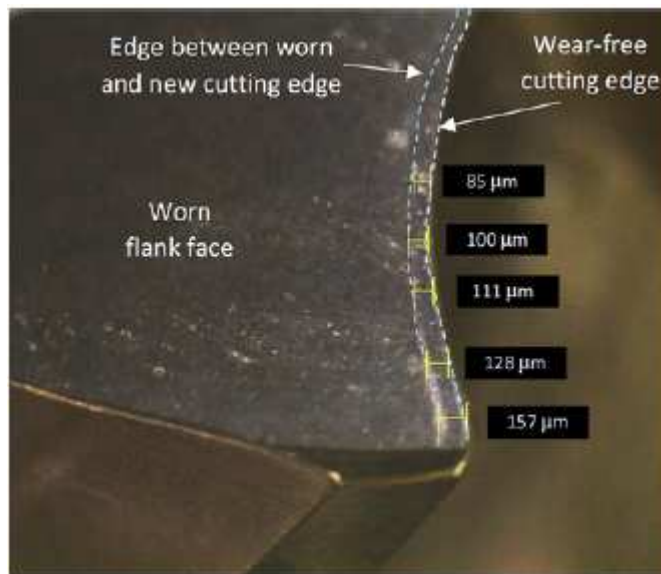


Figura 4.6: Quantificazione del labbro di usura

In figura 4.7 viene mostrato l'andamento del VB in funzione del numero di fori per entrambi gli utensili. L'usura sul fianco, oltre a crescere ovviamente con il progredire del numero dei fori eseguiti, risulta essere maggiore per la punta rivestita in TiAlN.

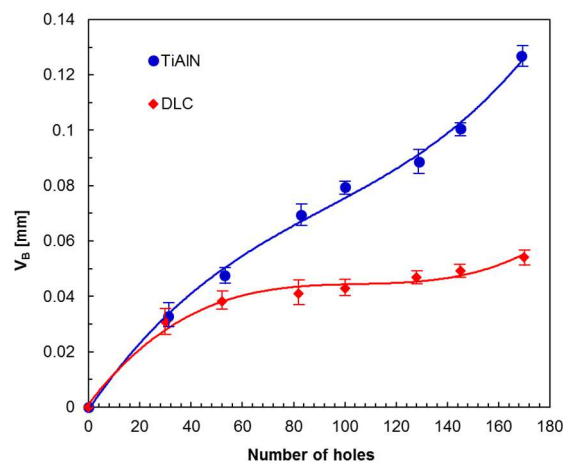


Figura 4.7: Andamento del VB in funzione del numero di fori

Gli effetti dell'usura sulla forza assiale si possono vedere dalle figure 4.8a e 4.8b, in cui viene riportato l'andamento della forza in funzione del tempo nell'esecuzione del primo e ultimo foro per entrambe le punte elicoidali.

L'andamento della forza risulta essere coerente con i risultati bibliografici [92].

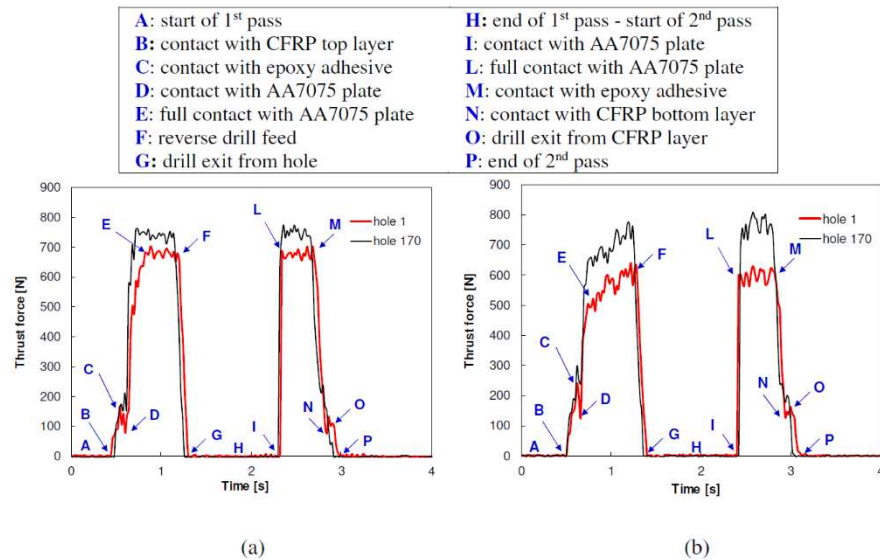


Figura 4.8: Andamento della Forza in funzione del tempo di foratura per il primo e l'ultimo foro per la punta (a) rivestita DLC e (b) in TiAlN

La forza cresce man mano che il tagliente impegna il primo strato di CFRP per poi diminuire, poiché c'è un innalzamento della temperatura, quando incontra la resina epossidica utilizzata per legare il core in lega di alluminio agli skins in CFRP. Nel momento in cui la punta inizia a forare il core di alluminio la forza riprende a crescere repentinamente per poi diventare quasi stazionaria.

Dopo la fase di evacuazione del truciolo, la punta torna a forare lo strato di alluminio restante con i valori della forza pressoché simili ai precedenti.

Quindi la forza decresce fino ad arrestarsi momentaneamente quando l'utensile incontra nuovamente la resina che unisce il secondo *skin* al core di alluminio.

La foratura del secondo skin di CFRP provoca un lieve aumento della forza fino a valori confrontabili con lo strato di ingresso. Man mano che l'utensile abbandona lo stack ibrido la forza decresce, fino ad annullarsi a foratura ultimata. In figura 4.9 troviamo l'andamento della forza in funzione del numero di fori per entrambe le punte oggetto dello studio. A tal proposito, non è significativo fare un confronto diretto tra i due utensili poiché i parametri di taglio adottati, consigliati dai relativi costruttori, risultano essere diversi.

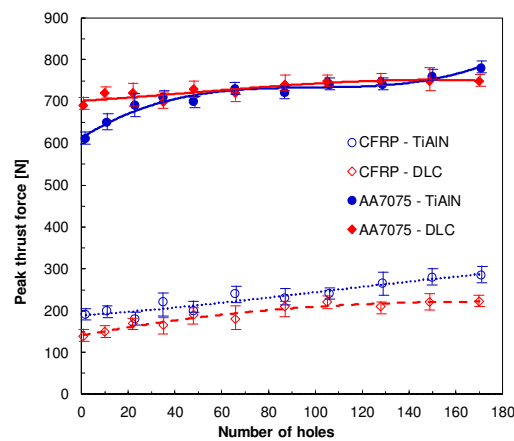


Figura 4.9: Evoluzione della forza con il numero di fori realizzati

La delaminazione superficiale misurata all'ingresso del foro presenta valori palesemente crescenti all'aumentare del numero dei fori, come mostrato in figura 4.10.

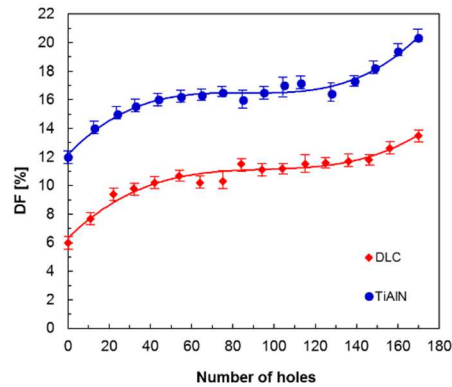


Figura 4.10: Andamento del DF con il numero di fori

Nell'ottica di un'attenta analisi dei requisiti di qualità di un foro è necessario focalizzare l'attenzione sull'usura dell'utensile, oltre che sul rispetto delle tolleranze geometriche e dimensionali imposte dalla particolare applicazione.

Nelle figure 4.11a e 4.11b vengono mostrati i risultati delle misure dei diametri dei fori, eseguite rispettivamente in corrispondenza di tre punti diversi lungo la profondità del foro: (i) nella sezione centrale del 1° strato di CFRP, (ii) nella sezione centrale del core in lega di alluminio e (iii) nella sezione centrale del 2° strato di CFRP.

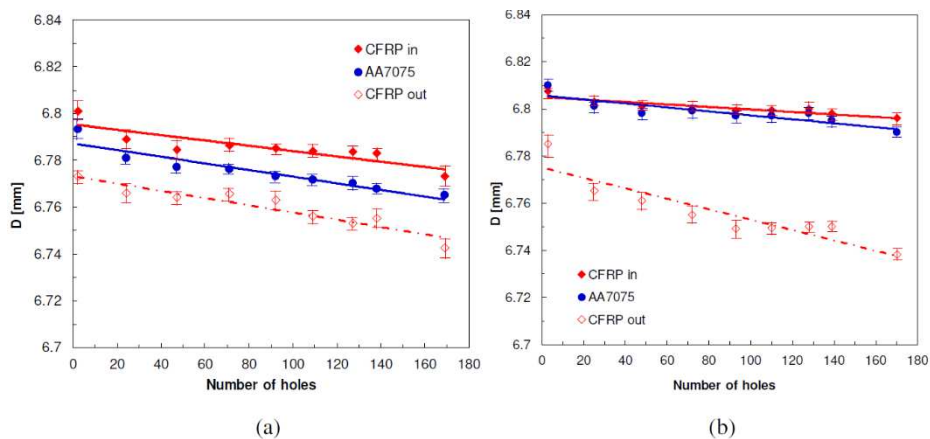


Figura 4.11: Evoluzione del diametro dei fori per la punta (a) rivestita DLC e (b) in TiAlN

Come già detto, è interessante ed utile investigare gli effetti dell'usura sulle altre grandezze caratteristiche della lavorazione di foratura. A tal proposito, le figure 4.12a, 4.12b, 4.12c mostrano l'effetto dell'usura rispettivamente sulla forza assiale, sul fattore di delaminazione e sul diametro dei fori per entrambi gli utensili investigati.

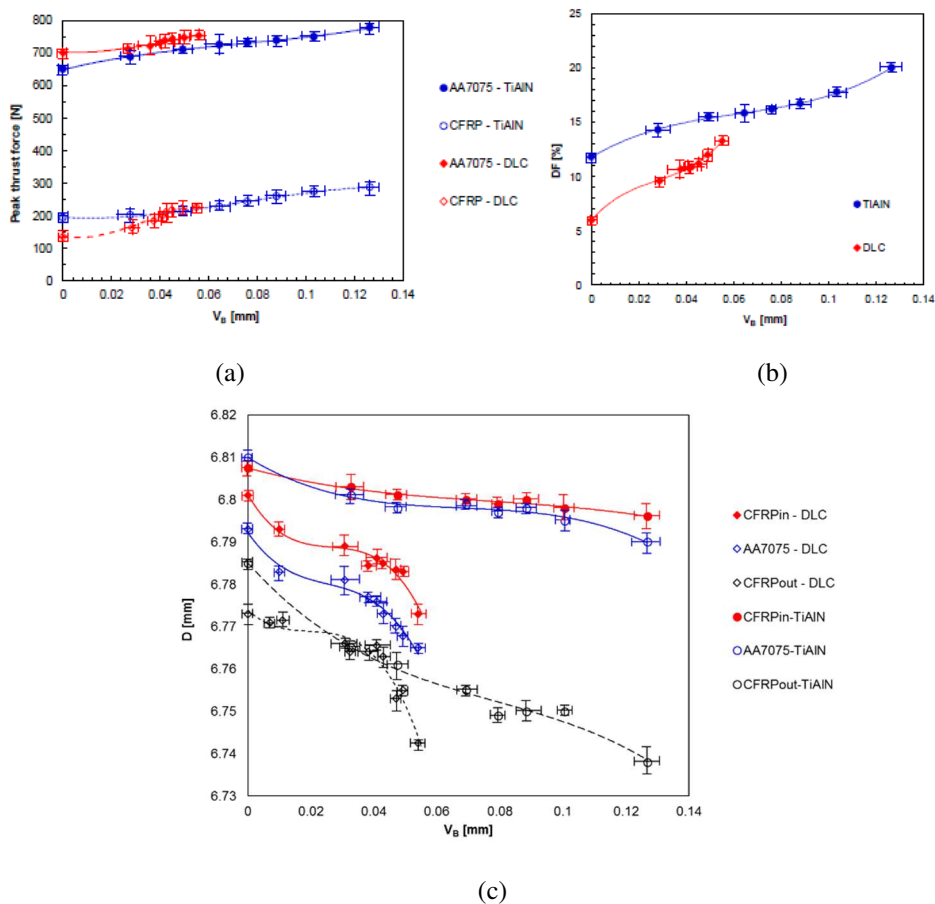


Figura 4.12: Correlazione del VB con (a) forza assiale, (b) fattore di delaminazione e (c) diametro dei fori

Da questi grafici si evince, come i valori della Forza assiale di spinta, della delaminazione e del diametro del foro siano fortemente legati all'usura della punta.

Conclusioni

L'attività di ricerca relativa a questo lavoro di tesi è stata quella di investigare e sperimentare alcuni processi di lavorazione, nell'ottica delle strategie di sviluppo ecosostenibile nell'ambito industriale. Altresì ha voluto evidenziare come alcuni indicatori (LCA) e metodologie (ANN) possono rappresentare un valido strumento di supporto all'ecoprogettazione dei processi.

Infine è stato effettuato uno studio di lavorabilità su dei materiali considerati ecoinnovativi, quali i compositi rinforzati con fibre di carbonio (CFRP).

L'obiettivo di tale lavoro, pertanto, è quello di fornire un contributo alla ricerca che in questo settore mira da una parte alla massimizzazione delle prestazioni dei materiali, dall'altro dall'adozione di lavorazioni e processi produttivi sostenibili, sia dal punto di vista dell'impatto sull'ambiente e sulla salute umana, che dei costi energetici.

Sulla base dei risultati ottenuti è possibile formulare le seguenti conclusioni:

Friction Stir Welding: Analisi LCA

I risultati derivanti dall'analisi dell'impatto ambientale del processo di Friction Stir Welding (FSW) di lamiera in lega di alluminio AA5754 hanno mostrato che:

- l'impatto ambientale è fortemente influenzato dai parametri di processo (velocità di rotazione ω e velocità di avanzamento v);
- la condizione che offre il minor impatto ambientale è quella caratterizzata da $\omega = 1200$ giri/min e $v = 100$ mm/min;

Conclusioni

- è stata stabilita una correlazione tra l'impatto ambientale e le proprietà meccaniche dei giunti, in termini di allungamento percentuale a rottura e di resistenza a trazione. Essa ha mostrato che la condizione più favorevole dal punto di vista dell'impatto ambientale è anche quella che garantisce il miglior compromesso tra proprietà meccaniche e sostenibilità;

Lo studio ha evidenziato come la metodologia LCA sia uno strumento in grado di orientare e supportare le azioni che devono essere intraprese per migliorare la gestione ambientale di un processo produttivo. Individuando le fasi sulle quali è possibile intervenire per diminuire l'impatto ambientale del processo, si può arrivare a ridurre i consumi di energia, di materie prime e la produzione di rifiuti, diminuendo di conseguenza i costi di produzione. È tuttavia necessario sottolineare che i modelli utilizzati per l'analisi di inventario sono limitati dalle assunzioni che sono implicitamente contenute in essi. L'accuratezza di uno studio LCA non può prescindere dall'accessibilità o dalla disponibilità di dati primari che garantiscano lo stesso grado di rappresentazione dei sistemi studiato. È ormai imperativa l'esigenza di sviluppare banche dati che rispecchino le realtà produttive locali e la necessità di metodi di valutazione completi di tutti gli indicatori di sostenibilità. La partecipazione attiva delle imprese diventa quindi *conditio sine qua non* per promuovere e realizzare azioni di riduzione degli impatti ambientali.

Friction Stir Welding: Previsione della forza verticale con reti neurali artificiali

In questo studio è stata valutata l'utilità e l'affidabilità dei modelli matematici basati sulle reti neurali artificiali nella previsione di grandezze che intervengono durante il processo di FSW di lamiere in lega di magnesio AZ31. In particolare,

Conclusioni

è stato costruito un modello che fosse in grado di prevedere l'andamento della forza verticale in funzione del tempo di saldatura al variare dei parametri di processo (velocità di rotazione ω e velocità di avanzamento v). I risultati ottenuti hanno mostrato che:

- il modello realizzato è in grado di prevedere la forma complessa della curva F-t in tutte le sue fasi (affondamento, saldatura, fine-uscita utensile);
- dal confronto con i dati sperimentali si è visto come il modello è abile a prevedere l'effetto della variazione di v ed ω sulle curve F-t;
- l'eccellente capacità predittiva è stata confermata rispettivamente dai bassi valori dell'errore relativo (RE) e di quello percentuale assoluto medio (AARE) e dall'alto valore del coefficiente di correlazione R;
- la rete ha un'eccellente capacità di generalizzazione, confermata utilizzando la tecnica del *Leave-one-out* nella previsione di condizioni non incluse nel *training set*.

Lavorazioni meccaniche Ecocompatibili

Il presente studio si è focalizzato sulla lavorabilità alle macchine utensili di componenti che hanno subito un'operazione preliminare di stampaggio a freddo, nell'ottica dello sviluppo di processi ecosostenibili.

Per realizzare una valutazione dal punto di vista tecnologico, è stato quindi eseguito un confronto con il processo "tradizionale" di tornitura da barra.

I principali risultati ottenuti possono essere così riassunti:

- la durata maggiore del tagliente, anche se di poco, la si ottiene nella lavorazione del materiale che ha subito una lavorazione a freddo preliminare;

Conclusioni

- in accordo con l'andamento del VB il materiale preliminarmente deformato a freddo mostra una migliore finitura superficiale ed un miglior mantenimento delle tolleranze dimensionali;
- il confronto tra la quantità di truciolo prodotto nei due casi ha evidenziato come ci sia effettivamente una sostanziale riduzione dello spreco di materia prima.

Materiali ecoinnovativi: Analisi del processo di Foratura di stacks ibridi CFRP/Alluminio

La crescente diffusione dell'impiego dei materiali compositi nell'industria aerospaziale, dell'automotive e, più in generale, in tutte le applicazioni industriali richiede un continuo lavoro di ottimizzazione delle tecniche di lavorazione.

A tal proposito, nel presente studio è stato analizzato il processo di foratura di strutture composite sandwich (CFRP/AA7075) utilizzando due utensili con diversi rivestimenti.

I principali risultati ottenuti possono essere così riassunti:

- dal confronto tra i due utensili utilizzati, quello rivestito in nitruro di titanio e alluminio (TiAlN) mostra un livello di usura maggiore;
- il valore della forza assiale di spinta cresce con il progredire del numero dei fori eseguiti;
- il valore del fattore di delaminazione cresce con il progredire del numero dei fori eseguiti e risulta essere più basso nel caso della punta rivestita in *Diamond Like Carbon* (DLC);
- per i singoli strati costituenti lo stack ibrido CFRP/AA7075 il valore del diametro dei fori ha un andamento decrescente dovuto principalmente all'usura degli utensili.

Bibliografia

- [1] Sustainable Europe Research Institute, Global 2000, “Friends of the Earth Europe, Overconsumption Our use of the world’s natural resources”, SERI, Vienna, 2009.
- [2] European Environment Agency, “The European Environment. State and Outlook. Natural Resources and Waste”, EEA, Copenhagen, 2010.
- [3] C. Hermann e S. Thiede, “Process Chain Simulation to Foster Energy Efficiency in Manufacturing”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, pp. 221-229, 2009.
- [4] UN World Commission on Environment and Development, Our Common Future, Oxford University Press, 1987.
- [5] R. Kates, T. M. Parris, A.A. Leiserowitz, “What is Sustainable Development: Goals, Indicators, Values, and Practice”, *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 2005.
- [6] E. Tiezzi, N. Marchettini, “Che cos’è lo sviluppo sostenibile?”, Donzelli Editore, Roma, 1999.
- [7] A. Morgante, “Dai sistemi produttivi tradizionali ai sistemi produttivi avanzati”, Maggioli Editore, 2012.
- [8] M. Germani, A. Luzi, M. Mandolini, M. Marconi, “End-of-Life Indices to Manage the Demanufacturing Phase during the Product Design Process”, *Proceedings of CARV 2013 – 5th International Conference on Changeable, Reconfigurable and Virtual Production*, Munich, Germany, 2013.

Bibliografia

- [9] J.R. Duflou, G. Seliger, S. Kara, Y. Umeda, A. Ometto, B. Willems, “Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study”, *CIRP Annals*, 2009.
- [10] P. Kopacek, B. Kopacek, “Intelligent, flexible disassembly”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30, pp. 554–560, 2006.
- [11] G. Copani, A. Brusafferri, M. Colledani, N. Pedrocchi, M. Sacco, T.Tolio, “Integrated De-Manufacturing systems as new approach to End-ofLife management of mechatronic devices”, *Proceedings of the 10th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, Istanbul, 2012
- [12] M. Colledani, G. Copani, T. Tolio, “De-Manufacturing Systems”. *Procedia CIRP*; 17; pp.14-19, 2014.
- [13] G. Boothroyd, P. Dewhurst and W. Knight, “Product Design for Manufacture and Assembly, 2nd Edition Revised and Expanded” Marcel Dekker, New York, 2002.
- [14] Citti et al., “Design for disassembly: una metodologia innovativa per la scelta della sequenza ottimale di disassemblaggio, in ottica eco-design”, Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università degli Studi di Firenze, 2003.
- [15] M. Perviaz, S. Panthapulakkal, KC Birat, M. Sain, and J. Tjong, “Emerging Trends in Automotive Light-Weighting through Novel Composite Materials”. *Materials sciences and Applications*, 7, pp. 26-38, 2016.
- [16] B. Harshal, S. Viraj, P. Baskar, “Material Optimization and Weight Reduction of Drive Shaft Using Composite Material”, *Journal of mechanical and civil Engineering*, 10(1), pp 39-46, 2013.
- [17] A. J. Beck, A. Hodzic, C. Soutis and C. W. Wilson, “Influence of Implementation of Composite Materials in Civil Aircraft Industry on reduction of Environmental Pollution and Greenhouse Effect”, *Mater. Sci. Eng*, 26, 2011.

Bibliografia

- [18] G.L. Baldo, M. Marino, S. Rossi, *Analisi del ciclo di vita*, Franco Angeli Ed, Roma, 2008.
- [19] SETAC, *Conceptual Framework for Life Cycle Assessment*, workshop record, Sandestin, Florida, February 1992.
- [20] ISO (UNI EN) 14040, *Environmental Management - Life Cycle Assessment -Principles and Framework*, International Organization for Standardization, Geneve, Switzerland, 2006.
- [21] ISO (UNI EN) 14044, *Environmental Management - Life Cycle Assessment Requirements and Guidelines*, International Organization for Standardization, Geneve, Switzerland, 2006.
- [22] Patent WO9310935, TWI Ltd Pr.: GB91259788, *Improvements relating to friction welding*, 27 Nov 1992.
- [23] T. Esther Akinlabi, and Stephen A. Akinlabi, “Friction Stir Welding Process: A Green Technology”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 71, 2012.
- [24] M. Cabibbo, A. Forcellese, M. Simoncini, “New Approaches to the friction stir welding of aluminum alloys”, *Joining Technologies, InTech*, pp 7-26, 2016.
- [25] G. Buffa, L. Fratini, J. Hua, R. Shivpuri, “Friction stir welding of tailored blanks: investigation on process feasibility”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 55-1, pp. 279–282, 2006.
- [26] H. Su, CS Wu, A. Pittner, M. Rethmeier, “Simultaneous measurement of tool torque, traverse force and vertical force in friction stir welding”, *Journal of Manufacturing Processes*, 15:495–500, 2013.
- [27] A.K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian, K. Elangovan, “Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminum alloy joints”, *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*; 40:286–296, 2009.
- [28] G. Buffa, A. Forcellese, L. Fratini, M. Simoncini, “Experimental and numerical analysis on FSWed magnesium alloy thin sheets obtained using

Bibliografia

- “pin” and “pinless” tool”, *Key Engineering Materials*, 504-506:747-752, 2012.
- [29] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, “Friction stir welding and processing”, *Materials Science and Engineering*, 50:1–78, 2005.
- [30] M. Simoncini, A. Forcellese, “Effect of the welding parameters and tool configuration on micro- and macro-mechanical properties of similar and dissimilar FSWed joints in AA5754 and AZ31 thin sheets”, *Materials and Design*, 41:50-60, 2012.
- [31] A. Forcellese, M. Simoncini, “Plastic flow behaviour and formability of FSWed joints in AZ31 thin sheets obtained using the “pinless” tool configuration”. *Materials and Design*, 36:123-129, 2012.
- [32] A. Forcellese, F. Gabrielli, M. Simoncini, “Mechanical properties and microstructure of joints in AZ31 thin sheets obtained by FSW using “pin” and “pinless” tool configurations”. *Materials and Design*, 34:219-229, 2012.
- [33] L.M. Serio, D. Palumbo, U. Galietti, L.A.C. De Filippis, A.D. Ludovico, “Analisi del processo di Friction Stir Welding applicato alla lega AA5754-H111: Comportamento meccanico e termico dei giunti” *Rivista Italiana della Saldatura*, 66:509–524, 2014.
- [34] O. Jolliet, M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet, G. Rebitzer, R. Rosenbaum, “IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6): 324-330, 2003.
- [35] F. E. Ciarapica, A. D'Orazio, A. Forcellese, M. Simoncini, Sustainability analysis of friction stir welding of AA5754 sheets, *Procedia CIRP*, doi:10.1016/j.procir.2016.06.081.
- [36] C. Drouillet, J. Karandikar, C. Nath, A.C. Journeaux, M. El Mansori, T. Kurfess “Tool life predictions in milling using spindle power with the neural network technique” *Journal of Manufacturing Processes*, 22:161–168, 2016.
- [37] S. Elkatatny, Z. Tariq, M. Mahmoud “Real time prediction of drilling fluid rheological properties using artificial neural Networks visible mathematical

Bibliografia

- model (white box)", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 146:1202–1210, 2016.
- [38] T. Deepan Bharathi Kannana, G. Rajesh Nannanb B. Suresh Kumarc, "Application of artificial neural network modeling for machining parameters optimization in drilling operation", *Procedia Materials Science* 5:2242-2249, 2014.
- [39] D. Venkatesan, K. Kannan, R. Saravanan, "A genetic algorithm-based artificial neural network model for the optimization of machining processes", *Neural Computing and Applications*, 18:135–140, 2009.
- [40] K.M. Kanti, P.S. Rao, "Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network", *Journal of Materials Processing Technology*, 200:300–305, 2008.
- [41] D.S. Nagesh, G.L. Datta, "Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks", *Journal of Materials Processing Technology*, 123:303–312, 2002.
- [42] J.Y. Jeng, T.F. Mau, S.M. Leu, "Prediction of laser butt joint welding parameters using back propagation and learning vector quantization networks", *Journal of Materials Processing Technology*, 99:207–218, 2000.
- [43] H. Ates, "Prediction of gas metal arc welding parameters based on artificial neural networks", *Materials & Design*, 28-7:2015–2023, 2007.
- [44] M.S. Choobi, M. Haghpanahi, M. Sedighi, "Prediction of welding-induced angular distortions in thin butt-welded plates using artificial neural networks", *Computational Materials Science*, 62:152–159, 2012.
- [45] A.N. Ahmed, C.W.M. Noor, M.F. Allawi, A. El-Shafie, "RBF-NN-based model for prediction of weld bead geometry in Shielded Metal Arc Welding (SMAW)", *Neural Computing & Applications*, doi:10.1007/s00521-016-2496-0, 2016.
- [46] P.F. Bariani, T. Dal Negro, S. Bruschi, "Testing and Modelling of Materials Response to Deformation", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 53(2):1–22, 2004.

Bibliografia

- [47] Y. Zhu, W. Zeng, Y. Sun, F. Feng, Y. Zhou, “Artificial neural network approach to predict the flow stress in the isothermal compression of as-cast TC21 titanium alloy”, *Computational Materials Science*, 50:1785–1790, 2011.
- [48] S. Mandal, P.V. Sivaprasad, S. Venugopal, “Artificial neural network modeling to evaluate and predict the deformation behavior of stainless steel type AISI 304L during hot torsion”, *Applied Soft Computing*, 9:237–244, 2009.
- [49] C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli, M. Simoncini, “Modelling of the rheological behaviour of aluminium alloys in multistep hot deformation using the multiple regression analysis and artificial neural network techniques”, *Journal of Materials Processing Technology*, 177:323-326, 2006.
- [50] A. Forcellese, F. Gabrielli, M. Simoncini, “Prediction of flow curves and forming limit curves of Mg alloy thin sheets using ANN-based models”, *Computational Materials Science*, 50:3184-3197, 2011.
- [51] G. Ambrogio, F. Gagliardi, “Design of an optimized procedure to predict opposite performances in porthole die extrusion” *Neural Computing & Applications*, 23:195–206, 2013.
- [52] P.R.Vundavilli, J. Phani Kumar, Ch Sai Priyatham , M.B. Parappagoudar, “Neural network-based expert system for modeling of tube spinning process”, 26:1481–1493, 2015.
- [53] M. Esmailzadeh, M. Aghaie-Khafri, “Finite element and artificial neural network analysis of ECAP”, *Computational Materials Science*, 63:127–133, 2012.
- [54] G. Buffa, L. Fratini, F. Micari, “Mechanical and microstructural properties prediction by artificial neural networks in FSW processes of dual phase titanium alloys”, *Journal of Manufacturing Processes*, 14:289–296, 2012.
- [55] M.H. Shojaeefard, R.A. Behnagh, M. Akbari, M.K.B. Givid, F. Farhanie, “Modelling and Pareto optimization of mechanical properties of friction stir

Bibliografia

- welded AA7075/AA5083 butt joints using neural network and particle swarm algorithm”, *Materials and Design*, 44:190–198, 2013.
- [56] H. Okuyucu, A. Kurt, E. Arcaklioglu, “Artificial neural network application to the friction stir welding of aluminum plates”, *Materials and Design*, 28:78–84, 2007.
- [57] V.D. Manvatkar, A. Arora, A. De, T. DebRoy, “Neural network models of peak temperature, torque, traverse force, bending stress and maximum shear stress during friction stir welding”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 17(6):460-466, 2012.
- [58] A. Forcellese, M. Martarelli, M. Simoncini, “Effect of process parameters on vertical forces and temperatures developed during friction stir welding of magnesium alloys”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85:595-604, 2016.
- [59] G. Buffa, L. Fratini, M. Simoncini, A. Forcellese, “In-process tool force and rotation variation to control sheet thickness change in friction stir welding of magnesium alloys”, *AIP Conference Proceedings* 1769:article number 100008. doi: 10.1063/1.4963502, 2016.
- [60] B. Efron, G. Gong, “A leisurely look at the bootstrap, the jackknife, and crossvalidation”, *The American Statistician*, 37(1):36–48, 1983.
- [61] D. Dudzinski, “A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 439–456, 2004.
- [62] T.D. Howes, H.K. Toenshoff, W. Heuer, “Environmental aspects of grinding fluids”, *Annals of CIRP* 40 (2), 623–629, 1991.
- [63] G. Byrne, E. Scholta, “Environmentally clean machining processes, a strategic approach”, *Annals of CIRP* 42 (1), 471–474, 1993.
- [64] S.Y. Hong, M. Broomer, “Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel”, *Clean Technologies and Environmental Policy* 2, 157–166, 2000.

Bibliografia

- [65] N.R. Dhar, et al., “Wear behaviour of uncoated carbide inserts under dry, wet and cryogenic cooling conditions in turning C60 steel”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 28, 146–152, 2006.
- [66] S.Y. Hong, Z. Zhao, “Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in cryogenic machining”, *Clean Technologies and Environmental Policy* 1, 107–116, 1999.
- [67] I.A. Greaves, E.A. Eisen, T.J. Smith, L.J. Pothier, D. Kriebel, S.R. Woskie, “Respiratory health of automobile workers exposed to metalworking fluid aerosols: respiratory symptoms”, *American Journal of Industrial Medicine*, 32 (5), 450-459, 1997.
- [68] F. Klocke, G. Eisenblatter, “Dry Cutting”, *Annals of the CIRP* 46, 519-526, 1997.
- [69] F. Pusavec, D. Kramar, P. Krajnik, J. Kopac, “Transitioning to sustainable production — part II: evaluation of sustainable machining technologies”, *Journal of Cleaner Production* 18, 1211–1221, 2010.
- [70] S. Kara e W. Li, “Unit process energy consumption models for material removal processes”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, n. 1, pp. 37-40, 2011.
- [71] C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli, M. Simoncini, “Effect of the lubrication-refrigeration technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420B”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 547–1554, 2006.
- [72] C. Bruni, et al., “Surface roughness modelling in finish face milling under MQL and dry cutting conditions”, *International Journal of Material Forming*, 1(1), 503-506, 2008.
- [73] C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli, M. Simoncini, “Hard turning of an alloy steel on a machine tool with a polymer concrete bed”, *Journal of Material Processing Technology*, 202, 493-499, 2008.

Bibliografia

- [74] D. Kramar, J. Kopac, “Machining of near-net shape forged pinions”, *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, 55 (2), 2012.
- [75] R. Cominotti, E. Gentili, “Near net shape technology: An innovative opportunity for the automotive industry”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24, 722–727, 2008.
- [76] K. Lange, Th. Herlan, “Material and energy saving by metal forming processes”, *Advanced Technology of Plasticity*, 1 (1990) 285.
- [77] J. Kopac, M. Bahor and M. Sokovic, “Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in fine turning of cold preformed steel work pieces”, *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, vol. 42, pp.707-716, 2002.
- [78] T. Schrader, M. Shirgaokar, T. Altan, “A critical evaluation of the double cup extrusion test for selection of cold forging lubricants”, *Journal of Materials Processing Technology*, 189, 36-44, 2007.
- [79] R. Pavel, K. Sinram, D. Combs, M. Deis, I. Marinescu, “Surface quality and tool wear in interrupted hard turning of 1137 steel shafts”, *Proceedings of International Conference on Precision Engineering 2003–2004*, Singapore, March 2004.
- [80] R. Zitoune, V. Krishnaraj, B. Sofiane Almabouacif, F. Collombet, M. Sima, A. Jolin, “Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/Aluminium sandwich”, *Composites Part B: Engineering*, 43, 1480–1488, 2012.
- [81] C.Y. Wang, Y.H. Chen, Q.L. An, X.J. Cai, W.W. Ming, M. Chen, “Drilling temperature and hole quality in drilling of CFRP/aluminum stacks using diamond coated drill”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16, 1689–1697, 2015.
- [82] R.K. Heinemann, S. Hinduja, “Investigating the feasibility of DLC-coated twist drills in deep-hole drilling”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44, 862–869, 2009.

Bibliografia

- [83] S. Gaugel, P. Sripathy, A. Haeger, D. Meinhard, T. Bernthaler, F. Lissek, et al., “A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon- fiber reinforced polymers (CFRP)”, *Composite Structures*, 155, 173–183, 2016.
- [84] A.T. Marques, L.M. Duraõ, A.G. Magalhaes, J.F. Silva, J.M.R.S. Tavares, “Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill”, *Composites Science and Technology*, 69, 2376–2382, 2009.
- [85] H. Hocheng, C.C. Tsao, “Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1403–1416, 2006.
- [86] L. Zhang, Z. Liu, W. Tian, W. Liao, “Experimental studies on the performance of different structure tools in drilling CFRP/Al alloy stacks”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 241–251, 2015.
- [87] M. Montoya, M. Calamaz, D. Gehin, F. Girot, “Evaluation of the performance of coated and uncoated carbide tools in drilling thick CFRP/aluminium alloy stacks”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 2111–2120, 2013.
- [88] F. Schultheiss, J. Zhou, E. Grönroft, J.E. Stahl, “Sustainable machining through increasing the cutting tool utilization”, *Journal of Cleaner Production*, 59, 298–307, 2013.
- [89] B.F. Kieffer, E. Lassner, “Tungsten recycling in today’s environment”, *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 139, 340-345, 1994.
- [90] A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert, “Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, 1185–1196, 2009.
- [91] A. Sanda, I. Arriola, V. Garcia Navas, I. Bengoetxea, O. Gonzalo, “Ultrasonically assisted drilling of carbon fibre reinforced plastics and Ti6Al4V”, *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 169–176, 2016.

Bibliografia

- [92] R. Zitoune, V. Krishnaraj, F. Collombet, “Study of drilling of composite material and aluminium stack”, *Composite Structures*, 92, 1246–1255, 2010.

Produzione scientifica derivante dalla presente attività ricerca

- **A. D'Orazio**, A. Forcellese, M. Simoncini: “Prediction of the vertical force during FSW of AZ31 magnesium alloy sheets using an artificial neural network-based model”, submitted to Neural Computing and Applications, under review.
- **A. D'Orazio**, M. El Mehtedi, A. Forcellese, A. Nardinocchi, M. Simoncini: “Tool wear and hole quality in drilling of CFRP/AA7075 stacks with DLC and nanocomposite TiAlN coated tools”, Journal of Manufacturing Processes.
- **A. D'Orazio**, M. El Mehtedi, A. Forcellese, M. Peralisi, M. Simoncini: “Effect of the rolling temperature on hot formability of ZAM100 magnesium alloy”, Proceedings of 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Gulf of Naples, Italy, 19 - 21 Luglio 2017.
- M. Bevilacqua, F.E. Ciarapica, **A. D'Orazio**, A. Forcellese, M. Simoncini: “Sustainability analysis of friction stir welding of AA5754 sheets”, Procedia CIRP, Volume 62, 2017, Pages 529-534.
- C. Bruni, **A. D'Orazio**, M. El Mehtedi, F. Gabrielli: “Forming behaviour of friction stir lap welded joints”, Proceedings of XII Convegno A.I.Te.M., Palermo, 7-9 Settembre 2015.
- C. Bruni, **A. D'Orazio**, M. El Mehtedi: “Friction stir lap joining of blanks under different conditions”, Key Engineering Materials, 2015, Vol. 651-653, pp. 1433-1438.
- C. Bruni, M. El Mehtedi, F. Gabrielli, **A. D'Orazio**: “Saldatura friction stir lap di lamiera”, Atti del 3° Congresso Nazionale del Coordinamento della Meccanica Italiana, Napoli, 30 giugno - 1 luglio 2014.

- G. Chiappini, M. Rossi, **A. D'Orazio**, S. Spigarelli, M. El Mehtedi: “Utilizzo di una tecnica ottica di griglia semiautomatica per la valutazione della formabilità della lega di magnesio ZAM100”, Atti del 3° Congresso Nazionale del Coordinamento della Meccanica Italiana, Napoli, 30 giugno - 1 luglio 2014.