

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale



**Politecnico
di Torino**

Stream Finishing

Sviluppo finitura superficiale su airfoil di
palette di turbina ad alta o bassa
pressione per motori aeronautici,
aeroderivati o turbogas

Relatori

Prof. Sara BIAMINO

Ing. Riccardo MANTOAN

Candidato

Riccardo CIMINO

Aprile 2024

Sommario

Il lavoro svolto nel seguente documento ha il compito di illustrare un nuovo processo di finitura superficiale per applicazioni aeronautiche e turbine aero-derivative, chiamato **Stream Finishing**. Tale processo è già in utilizzo su molte apparecchiature impiegate nel campo dell'utensileria, gioielleria e abbigliamento.

Si andranno a spiegare le caratteristiche generali delle turbomacchine, le caratteristiche dei loro componenti e le loro prestazioni. Si valuterà, in oltre, il perché l'effetto della rugosità è dannoso dal punto di vista delle prestazioni sulle palettature delle turbine ad alta pressione rivestite da strati protezione termica.

Le prove sperimentali sono state svolte presso l'azienda **ATLA S.R.L** utilizzando il macchinario recentemente acquistato per effettuare questo tipo di lavorazioni di finitura superficiale. Nel corso degli ultimi capitoli si andrà ad analizzare come i vari parametri della lavorazione influiscono sulla rugosità finale dei componenti, i test sono stati eseguiti su varie geometrie di palette e settori di turbine specialmente di alta pressione, partendo da geometrie di dimensioni contenute fino ad arrivare a componenti attualmente impiegati a livello produttivo, di medie dimensioni.

Ringraziamenti

Vorrei dedicare principalmente questo lavoro a tutta la mia famiglia, in particolare ai miei genitori, mia sorella, le mie nonne ed i miei zii, sono sempre stati tutti dei punti di riferimento che mi hanno supportato in questi anni accademici e permesso di raggiungere questo traguardo.

Porgo i miei ringraziamenti alla relatrice Sara Biamino, è sempre stata disponibile ad aiutarmi sotto ogni aspetto legato a questo lavoro di tesi.

Ringrazio l'Ing. Riccardo Mantoan, il quale mi ha insegnato molto, mi ha fornito il supporto necessario per svolgere il lavoro di tesi prima e tutt'ora è il mio punto di riferimento all'interno dell'azienda.

Ringrazio l'azienda ATLA per l'opportunità che mi ha concesso, ringrazio tutti i colleghi che in questi mesi mi hanno accompagnato in questo percorso finale.

Infine, un ringraziamento speciale va a Giulia e alla sua famiglia. Lei è la mia ragazza, una donna speciale, è sempre stata al mio fianco ed ha condiviso con me tutte le emozioni di questi anni accademici, è stata la mia forza, ha saputo motivarmi soprattutto nei momenti di sconforto, ed è sicuramente grazie a lei che oggi sono riuscito a portare a compimento questo percorso.



INTRODUZIONE AZIENDA

ATLA S.r.l.

Fondata nel 1978 e con oltre 700.000 parti trattate, **ATLA** (Azienda Torinese Lavorazioni Aeronautiche) è un'azienda italiana con esperienza in Processi Speciali e rivestimenti innovativi per attività di produzione e riparazione di componenti di motori aeronautici e turbine a gas high-tech per i più importanti OEM.

All'interno del gruppo giapponese **Mitsubishi Heavy Industries**, tra i principali al mondo nei settori dell'energia, della logistica, delle infrastrutture, dei macchinari industriali, dell'aerospazio e della difesa, ATLA offre al Cliente la verticalizzazione di diversi Processi Speciali, gestendo una catena di fornitori qualificati, tra i quali la consociata TAG, specializzata in trattamenti termici per il mercato automobilistico, aerospaziale, biomedicale e industriale. L'azienda è stata acquisita nel 2004 con l'obiettivo di creare un polo leader nei Processi Speciali integrati. La stretta collaborazione consente di operare ottimizzando i processi, ponendosi come interlocutore unico nella fornitura di un prodotto finito.

Lo stabilimento ATLA, oltre 15.000 metri quadrati progettati secondo le ultime specifiche in ambito di efficienza e risparmio energetico, si trova a Chieri (TO), a circa 15 chilometri dalla città di Torino, un eccellente polo logistico, ben collegato ai principali hub aerospaziali europei.

Dal punto di vista qualitativo, ATLA adotta e migliora costantemente il proprio Sistema di Gestione Integrato, in conformità ai principali standard ISO. Inoltre, è certificata **AS/EN 9100** ed **AS/EN 9110** per i requisiti aerospaziali e accreditata **Nadcap** per i Processi Speciali strategici: trattamenti termici, rivestimenti, foratura laser, elettroerosione, saldatura e controlli non distruttivi.

Dal 2022, è Membro Affiliato dell'**International Aerospace Quality Group (IAQG)**, l'organizzazione mondiale per la Qualità delle Industrie e parte integrante dell'associazione italiana **AICQ Aerospace**, contribuendo alla qualità della performance aerospaziale.

Per ulteriori informazioni, visita il sito web atla.it.

Indice

Elenco delle figure	VIII
Elenco delle tabelle	X
1 Turbomacchine	1
1.1 Classificazione	1
1.2 Principi di funzionamento	2
1.3 Turbina a Gas	3
1.4 Prestazioni turbine aeronautiche	5
1.4.1 Turbina di alta pressione	7
1.4.2 Turbine di bassa pressione	7
1.5 Rivestimento su palette e settori di alta pressione	8
1.6 Effetti della rugosità sulle prestazioni delle palette	12
1.7 Turbine a gas Aero-derivate	14
2 Processi di lavorazione finitura superficiale	16
2.1 Processi tradizionali	16
2.2 Stream Finishing	18
3 Macchinario Otec	22
3.1 Descrizione generale macchinario	22
3.1.1 Modulo Principale	23
3.1.2 Media	26
3.1.3 Modulo Secondario	28
3.2 Parametri di progetto lavorazione	30
4 Studio parametri macchina in ATLA	33
4.1 Descrizione del problema	33
4.2 Studio degli effetti dei parametri di progetto	37
4.2.1 Risultati ottenuti	44
4.2.2 Analisi erosione maschere di supporto	46

4.3	Conclusioni utili per studi futuri	49
5	Passaggio produttivo	50
5.1	Studio delle nuove attrezzature	50
5.2	Sviluppo di nuovi programmi di lavorazione per pale turbogas . . .	53
5.3	Analisi di fattibilità di un settore di turbina	57
5.3.1	Mascheratura	57
5.3.2	Prove in macchina	58
5.4	Guadagni di tempo e costi in percentuale	61
6	Conclusioni Finali	64

Elenco delle figure

1.1	Schema Turbina a Gas	3
1.2	Ciclo Brayton	5
1.3	Stadio generico di turbina	6
1.4	Pala di turbina ad alta pressione di Turbogas	8
1.5	Processo APS	10
1.6	Processo HVOF	11
1.7	Rugosità calcolata in Ra	13
2.1	Stream Finishing	18
3.1	Modulo principale macchina OTEC SF	24
3.2	Analisi contenitore di lavorazione	25
3.3	Media ceramico abrasivo	27
3.4	Media plastico abrasivo	27
3.5	Media abrasivo per microfinitura	28
3.6	Media in ossido di Zirconio	28
3.7	Media in Acciaio Inox abrasivo	29
3.8	Centrifuga macchina OTEC	29
3.9	Parametri di progetto	30
3.10	Macchina con componenti immersi a pieno carico	31
4.1	Prototipo mascheratura	35
4.2	Rugosimetro SAMA tools	36
4.3	Rugosimetro RT10	36
4.4	Provini utilizzati per le prove sperimentali	39
4.5	Maschera superiore e tappo inferiore	47
4.6	Tappo nuovo; Tappo dopo 4 ore di lavorazione	48
4.7	Tappo dopo 8 ore di lavorazione; Tappo dopo 15 ore di lavorazione	48
5.1	Prototipo nuove mascherature	51
5.2	Mascheratura Pala Turbogas	52
5.3	Montaggio del componente in macchina	53

5.4	Punti misurati sul dorso e sul ventre	55
5.5	Punti misurati sulla piattaforma	55
5.6	Mascheratura del settore	58
5.7	Montaggio in macchina dei settori	59
5.8	Montaggio in macchina vista dal basso	60
5.9	Immersione dei settori vista laterale	61
5.10	Lead Time Finitura Row	62
5.11	Costo Finitura Row	63

Elenco delle tabelle

4.1	Parametri di progetto lavorazione 1	37
4.2	Parametri di progetto lavorazione 2	38
4.3	Parametri di progetto lavorazione 3	38
4.4	Misure di rugosità della lavorazione 1	39
4.5	Misure di rugosità della lavorazione 2	40
4.6	Misure di rugosità della lavorazione 3	41
4.7	Parametri di progetto lavorazione RCI	42
4.8	Misure di rugosità della lavorazione RCI	43
4.9	Confronto lavorazione 3 con RCI	43
4.10	Misure di rugosità della lavorazione dorso e ventre statico	45
4.11	Misure di rugosità della lavorazione dorso e ventre dinamico	46
4.12	Confronto lavorazioni	46
5.1	Parametri di progetto lavorazione pala rivestita	54
5.2	Misure di rugosità lato dorso	54
5.3	Misure di rugosità lato ventre	56
5.4	Misure sulla Piattaforma	56

Capitolo 1

Turbomacchine

Le turbomacchine sono macchine il cui scopo è lo scambio di energia tra gli elementi rotanti presenti all'interno e il fluido che le attraversa. Lo scambio di energia avviene durante la rotazione degli organi calettati sull'albero, chiamati rotor, ai quali sono montate le pale che vengono messe in movimento dal fluido in transito. Il tutto è alloggiato insieme a un componente statorico anch'esso munito di palettatura. Lo studio delle prestazioni dei motori aeronautici si basa sui cicli termodinamici, con l'obiettivo di ottenere valori massimi di rendimento termodinamico mantenendo contenute le dimensioni in termini di ingombri e peso.

1.1 Classificazione

Si possono effettuare diverse classificazioni delle turbomacchine in base alle caratteristiche d'ingresso del fluido nella macchina e agli scambi energetici che vengono effettuati. Considerando una classificazione dove avvengono scambi energetici, si possono definire **turbomacchine motrici** quando il fluido cede energia alla macchina, oppure **turbomacchine operatrici** quando è la macchina a cedere energia al fluido. L'energia viene scambiata sotto forma di lavoro "L", quindi, le turbomacchine motrici avranno $L < 0$ mentre le turbomacchine operatrici $L > 0$.

Un'altra classificazione può essere in base alla direzione principale d'ingresso del fluido: si definiscono **turbomacchine assiali** quando il flusso è diretto principalmente seguendo l'asse di rotazione della macchina, invece si parla di **turbomacchine radiali** quando il flusso principale ha come direzione prevalente quella radiale, esiste anche una versione mista che è un ibrido di queste due configurazioni.

Un'ultima classificazione che si può fare è in base a dove si concentra lo scambio energetico, si possono distinguere in **turbomacchine ad azione** le macchine dove il salto di pressione avviene tutto nello statore e nel rotore avviene solo una

variazione di energia cinetica, mentre si parla di **turbomacchine a reazione** quando il salto di pressione è elaborato sia nel rotore che nello statore.

1.2 Principi di funzionamento

Le turbomacchine scambiano energia con il fluido attraverso uno o più stadi, per "stadio" viene inteso l'insieme di un rotore e di uno statore, quest'ultimo è il componente fisso dello stadio in cui avviene una trasformazione di energia, da cinetica a termica o viceversa, invece, il rotore è il componente rotante in cui avviene lo scambio di energia che passa dalla macchina al fluido o viceversa. I motori aeronautici solitamente sono macchine multistadio, queste saranno formate da più stadi montati consecutivamente, i rotori di questo tipo di macchina saranno calettati tutti sullo stesso albero al fine di raggiungere i rapporti di pressione prestabiliti.

Andando ad analizzare cosa succede nel rotore, si può stimare che lo scambio di energia nell'unità di tempo è pari alla variazione di entalpia totale del flusso, ipotizzando che l'energia totale si conservi si può scrivere che:

$$L = \Delta h = h_{02} - h_{01}$$

Con il pedice 1 si intende la sezione d'ingresso e con il pedice 2 si indica la sezione d'uscita. Un'altra ipotesi che si può fare è quella relativa alla conservazione della portata:

$$\dot{m} = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2$$

dove ρ è la densità del fluido, con u si indica la componente della velocità assiale e A è l'area di passaggio all'interno della sezione. Inoltre, per le turbomacchine, vale l'equazione di Eulero per lo scambio di potenza tra macchina e fluido, ovvero:

$$L = C \cdot \omega$$

dove con ω si indica la velocità di rotazione dell'albero, e il parametro C indica la coppia generata dalla turbomacchina, che viene ricavata dal teorema della quantità di moto, andando a considerare un flusso stazionario, con sezioni d'ingresso e uscita costanti e trascurando altre coppie resistenti. Applicando queste semplificazioni si ottiene che la coppia applicata all'albero e che verrà di conseguenza trasmessa al fluido sarà pari a:

$$C = \dot{m} r_2 u_{t2} = \dot{m} r_1 u_{t1}$$

Qui si vede che la componente di velocità che viene modificata dallo scambio energetico è solamente quella tangenziale.

È possibile riscrivere l'equazione di Eulero in termini di entalpia totale:

$$\frac{L}{\dot{m}} = \frac{\Delta h_0}{\dot{m}} = \frac{C \cdot \omega}{\dot{m}}$$

$$\Delta h_0 = \omega(r_2 u_{t2} - r_1 u_{t1})$$

Questa è l'equazione di Eulero che mette in relazione le temperature e le pressioni all'interno della turbomacchina (che vengono descritte all'interno dell'entalpia totale) con le velocità di rotazione e la coppia relativa al funzionamento della macchina.

Da questo possiamo vedere che, se mi trovo nella condizione con $\Delta h_0 > 0$, quindi il lavoro viene effettuato sul fluido, allora si tratterà di una macchina operatrice, ovvero un **compressore**.

Se, invece, si ha un $\Delta h_0 < 0$ in questo caso si ha una diminuzione della quantità di moto quando il fluido attraversa il rotore, quindi sarà il fluido a fornire lavoro sulla macchina e di conseguenza si tratterà di una macchina motrice, ovvero una **turbina**.

1.3 Turbina a Gas

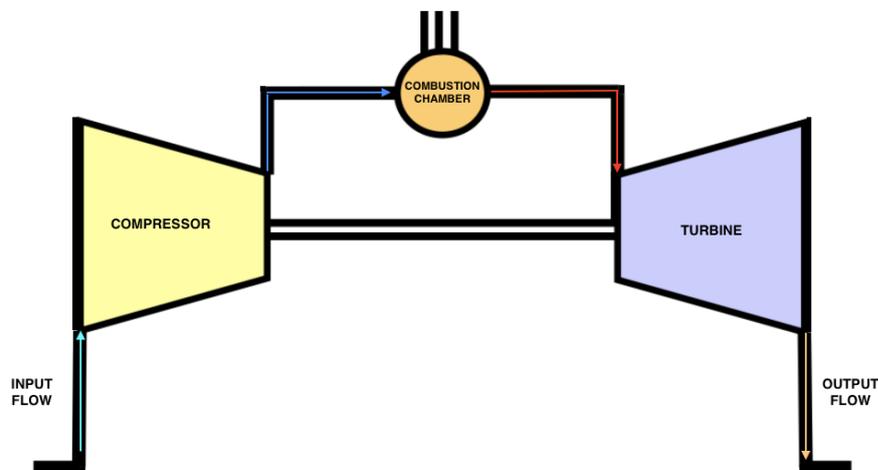


Figura 1.1: Schema Turbina a Gas

La turbina a gas è un motore a combustione interna che, mediante l'utilizzo di turbomacchine, converte energia chimica in lavoro utile per la produzione di spinta. Il propellente tipicamente utilizzato in campo aeronautico è il cherosene,

ma possono essere impiegati anche metano o altri idrocarburi come il diesel. Nella sua configurazione più semplice, la turbina a gas è formata dai suoi componenti principali che sono la presa d'aria, il compressore, la camera di combustione, la turbina e l'ugello di scarico.

Il flusso d'ingresso viene incanalato attraverso la presa d'aria, che serve per direzionare il flusso e regolare la portata. Successivamente il flusso incontra il compressore, tipicamente multistadio, formato in sequenza da un rotore e da uno statore, il compito fondamentale di questo componente è quello di preparare il flusso con una pressione tale da poter essere immesso all'interno della camera di combustione. Il compressore viene calettato sullo stesso albero della turbina, quindi sarà questa a fornire il lavoro che gli occorre per il suo funzionamento. Nella camera di combustione avviene il processo chimico dove il propellente, reagendo con l'ossidante, rilascia energia sotto forma di calore portando ad un aumento di temperatura e di entalpia. Si arriva ad ottenere temperature molto elevate e per questo motivo le pareti della camera dovranno essere protette dai flussi di calore con rivestimenti realizzati appositamente. La portata d'aria calda andrà a finire nella turbina dove si espanderà ed è grazie a questo verrà generato il lavoro utile del componente, l'energia netta risultante verrà quindi utilizzata come energia meccanica, che in campo aeronautico servirà per produrre la spinta quando i gas esausti verranno espulsi mediante un ugello di scarico. Mentre, in campo energetico, l'energia utile al posto di essere utilizzata per la spinta viene riconvertita in energia elettrica mediante degli alternatori accoppiati alla turbina.

Il funzionamento ideale in campo fisico viene rappresentato mediante il **ciclo Brayton**, in cui si ipotizzano compressioni ed espansioni isentropiche e la combustione si ipotizza che avvenga a pressione costante.

È stato già discusso in precedenza che, nel caso reale, il compressore ha un aumento di entalpia in quanto è una macchina operatrice, mentre la turbina ha una diminuzione di entalpia poiché è una macchina motrice.

Nella *Fig. 1.2*, viene riportato il ciclo Brayton espresso in termini di temperatura ed entropia, i punti riportati in nero indicano il ciclo ideale mentre in blu sono riportati i punti nel caso reale.

È possibile andare a definire il rendimento del ciclo come:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

dove: " $\beta = \frac{P_2}{P_1}$ " è il rapporto di compressione e " γ " è il coefficiente di dilatazione adiabatica. Il rendimento della macchina dipenderà dal rapporto di compressione, infatti, tanto più alto sarà β e tanto maggiore sarà il rendimento termodinamico. Questo sarà sempre inferiore all'unità per un ciclo reale, nel caso di propulsori aeronautici si aggira intorno a 0,9 poiché si riesce ad accelerare il flusso all'interno

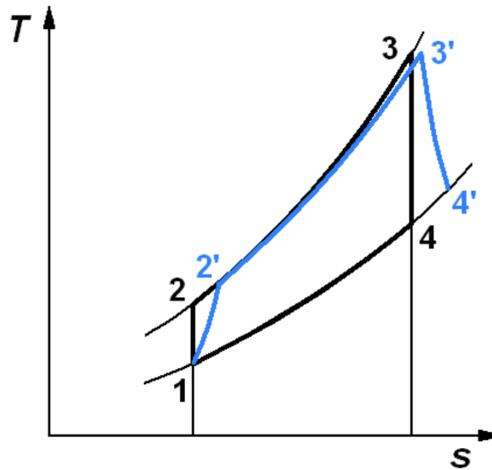


Figura 1.2: Ciclo Brayton

dell'ugello andando a generare la spinta propulsiva. Si generano rendimenti decisamente più bassi nel caso di aeroderivati dove il rendimento si aggira intorno allo 0,4/0,5.

1.4 Prestazioni turbine aeronautiche

In campo aeronautico, tipicamente, vengono impiegate turbine assiali, rispetto alle turbine radiali, elaborano una portata maggiore ed hanno la possibilità di essere multistadio. Andando sempre a fare un paragone tra turbine assiali e radiali, il singolo stadio di una turbina assiale riesce ad elaborare salti di pressione minori, ma avendo la possibilità di poter mettere in serie più stadi, si ottengono poi prestazioni totali migliori.

Le considerazioni iniziali che verranno fatte in questa sezione saranno valide sia per le turbine di alta pressione sia per quelle di bassa pressione.

Lo stadio è formato in ordine da uno statore e da un rotore. Solitamente sono preferite le turbine a reazione, dove il salto di pressione si ha in parte nello statore, ma il grosso avviene poi nel rotore. Le turbine di questo tipo sono caratterizzate da rendimenti maggiori e da elevati rapporti di spinta-peso, questo perché risultano più leggere rispetto a quelle ad azione grazie al minore numero di stadi utilizzati.

Il compito dello statore è quello di far ruotare il flusso fornendogli una componente trasversale per l'ingresso nel rotore. All'interno dello stadio, rispetto al compressore, è possibile avere variazioni angolari maggiori grazie ad un gradiente favorevole di pressione e questo porta ad avere maggiori variazioni di energia con alte efficienze.

Proprio per questo motivo le turbine riescono ad avere un numero di stadi minori rispetto ai compressori risultando più compatte e leggere.

Essendo strettamente collegati, la portata di una turbina a gas è limitata dal numero di Mach in ingresso del compressore, ovvero le portate sono limitate dalle condizioni operative del compressore.

Lo scopo della turbina è quello di far guadagnare velocità al flusso a scapito di una diminuzione di pressione nello statore per poi andare a sfruttare quest'energia cinetica nel rotore. Infatti, a parità di portata e velocità assiale, avremmo una riduzione di densità dovuta ad un aumento di sezione trasversale e quindi di un'espansione per far accelerare il fluido. Nel caso di motori aeronautici, al fine di avere pesi minori, si cerca di avere il minor numero di stadi possibili. Questo discorso non si applica nel caso di aeroderivati.

Andando ad esaminare meglio quello che avviene all'interno di uno stadio di turbina, nello statore la velocità d'ingresso (V_1) proveniente dalla camera di combustione tendenzialmente arriva in modo quasi assiale. Per far avvenire il salto di pressione richiesto, l'angolo assoluto associato alla velocità d'uscita dello statore (V_2) dovrà avere valori elevati, in generale si potrà avere un angolo compreso tra i 60° e i 75° . Il profilo scelto dev'essere tale da massimizzare il più possibile il rendimento della macchina e produrre una spinta maggiore. Una tipica ipotesi che si formula nello studio di turbine è quella di avere triangoli di velocità simmetrici tra statore e rotore in modo da ottenere poi delle velocità d'uscita dal rotore il più possibili assiali. Si va ad effettuare lo studio con grado di reazione (R) pari a 0,5.

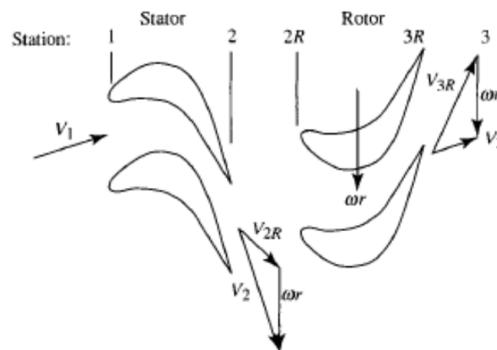


Figura 1.3: Stadio generico di turbina

Grazie ad un gradiente di pressione favorevole si hanno minori problemi legati alla separazione della vena fluida sulle palette, di conseguenza si ottengono delle geometrie che possono deflettere maggiormente il fluido senza incorrere in problemi legati allo stallo, andando ad ottenere un lavoro maggiore per ogni stadio.

Si può definire il lavoro della turbina come:

$$L_t = \omega r(V_2 + V_3)$$

oppure espresso in termini di variazione di entalpia totale:

$$L_t = h_1^\circ - h_3^\circ = h_2^\circ - h_3^\circ = \eta_t \cdot cp \cdot (T_2^\circ - T_3^\circ) = \eta_t \cdot cp \cdot T_2^\circ \left(1 - \frac{1}{\beta_t^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right)$$

Si è espresso tutto in termini di temperatura d'ingresso turbina (TIT) del rapporto di compressione (β_t), avendo fatto inoltre l'ipotesi che nello statore non si abbiano variazioni di entalpia totale.

1.4.1 Turbina di alta pressione

Questo componente sarà calettato direttamente con il compressore, quindi i due componenti dovranno ruotare allo stesso numero di giri. Le palette delle turbine ad alta pressione saranno investite dai flussi caldi provenienti dalla camera di combustione e poiché la temperatura d'ingresso nella turbina è proporzionale al lavoro, per ottenere un lavoro della turbina elevato occorrerà avere temperature d'ingresso (T_2°) elevate. Le palette delle turbine aeronautiche vengono realizzate con leghe di alluminio-nichel principalmente per la loro leggerezza, ma le temperature d'uscita della camera di combustione sono molto più elevate rispetto al punto di fusione di queste leghe. Per sottoporre le palette a temperature maggiori, quindi andare ad ottenere prestazioni maggiori, si rivestono i componenti con materiali ceramici, questo argomento verrà analizzato approfonditamente in un altro paragrafo. Grazie a questo rivestimento ed altri sistemi di raffreddamento, nel tempo, si sono ottenute prestazioni ed efficienze sempre più alte. Come detto in precedenza, si vuole ottenere un flusso che sia il più possibile assiale all'uscita della turbina, però, nel caso in cui ci siano due turbine, si accettano anche dei flussi che non siano proprio assiali all'uscita della turbina di alta pressione, a patto che il processo si sviluppi con il minor numero di stadi. Il flusso poi verrà raddrizzato successivamente dalla turbina di bassa pressione.

1.4.2 Turbine di bassa pressione

Per quanto riguarda la turbina di bassa pressione, tipicamente gira con un velocità minori rispetto alla turbina di alta pressione. Questa turbina sarà calettata nello stesso albero del compressore di bassa pressione, quindi le velocità di rotazione saranno limitate dalle condizioni operative di questo componente. Il flusso al suo ingresso sarà proveniente dalla turbina di alta pressione, che avrà già consumato parte di energia utile, quindi, avrà temperature decisamente più basse ottenendo

dei lavori utili inferiori. I componenti che costituiscono questa parte del motore non vengono rivestiti con materiale ceramico poiché non si raggiungono mai temperature elevate come nella turbina di alta pressione, al massimo si effettua un rivestimento con uno strato di materiale metallico mediante processi di alluminizzazione o cromizzazione. Questi ultimi due processi citati vengono utilizzati per ritardare l'ossidazione a caldo dei componenti, aiuta a mantenere invariate le caratteristiche termo-meccaniche e permette delle vite operative più lunghe dei componenti. Il rendimento di questa turbina dipenderà dalla direzione d'uscita del flusso, infatti, sarà tanto più alto quanto più sarà assiale la direzione del flusso in uscita.

1.5 Rivestimento su palette e settori di alta pressione

Per tenere sotto controllo la temperatura dei materiali metallici di cui sono formate le pale delle turbine a gas, si utilizzano dei metodi di refrigerazione ad aria con film cooling e/o rivestimenti a protezione della superficie. L'obiettivo per aumentare le prestazioni delle turbine è quello di raggiungere temperature elevate all'ingresso del primo stadio (Turbine Inlet Temperature, TIT) ovvero la T_2° e , per poterlo raggiungere, occorre che i componenti resistano ad effetti negativi che potrebbero derivare dalla loro vita operativa come elevati gradienti termici, shock termico, il fenomeno del creep, corrosione e ossidazione ed, infine, fenomeni legati alla fatica.



Figura 1.4: Pala di turbina ad alta pressione di Turbogas

Per poter mitigare questi effetti negativi, si sono sviluppati dei sistemi di rivestimento a barriera termica, più comunemente conosciuti come **Thermal Barrier Coating** (TBC) i quali permettono di allungare la vita operativa dei componenti che dovranno lavorare sotto l'effetto di elevate temperature come accade all'interno della camera di combustione o nei primi stadi della turbina. Questi rivestimenti permettono di ottenere alte prestazioni, perché si possono raggiungere valori di TIT maggiori che portano a rendimenti più alti e tutto questo porta ad ottenere valori di spinta più elevati. Prima di poter effettuare il processo di rivestimento però, la superficie dev'essere preparata per avere un'adeguata ruvidità, essere ripulita nel caso in cui si tratti di un repair, al fine di poter far aderire al meglio le particelle che verranno poi spruzzate per formare il rivestimento. Questa preparazione è il processo comunemente conosciuto come sabbiatura.

La TBC è formata da due strati: un primo strato esterno realizzato in materiale ceramico, questo viene chiamato **top coat**; ed un secondo strato interno di tipo metallico chiamato **bond coat**. I componenti trattati saranno rivestiti con questi due strati, inizialmente viene depositato uno strato metallico di bond coat che serve per l'ancoraggio del top coat, ovvero un ceramico refrattato e termicamente isolante. In ambito aerospaziale tra il bond coat e il top coat si inserisce un legante chimico, uno strato sottile di ossido. Le temperature in gioco possono essere di molto superiori rispetto al punto di fusione dei metalli che vengono impiegati per queste turbomacchine, si arriva a temperature che superano i 1300/1400 °C ed è per questo che vengono impiegati dei materiali ceramici.

Per il top coat di ceramica esterno viene impiegato l'ossido di zirconio parzialmente stabilizzato con ittrio (YSZ), è grazie a questo rivestimento che i componenti possono resistere ai flussi di calore così alti. Per la sua realizzazione si utilizzano principalmente due tipologie di processi:

- Atmospheric plasma spraying (APS) prevede la generazione di un getto al plasma che irradia la superficie fino a formare il rivestimento. Il fascio di plasma viene generato da un gas di lavoro, tipicamente argon/idrogeno, il quale viene trasformato in plasma attraverso un riscaldamento della miscela dovuto alla ionizzazione delle particelle causata da una forte scarica ad arco generata tra un anodo ed un catodo. Il plasma che ne uscirà sarà ad elevate temperature e attraverso una rapida espansione si otterrà una velocità elevata del fascio che verrà messo a contatto con la polvere iniettata in granelli molto piccoli con diametri da 20-90 μm . Le goccioline fuse che verranno a formarsi saranno direzionate ed andranno a depositarsi sul componente precedentemente preparato con lo strato di bond coat metallico. Questo processo viene tipicamente effettuato per turbine a gas e aero-derivati poiché produce caratteristiche più adatte a questo tipo di turbine, ovvero questo tipo di rivestimento è maggiormente indicato a resistere agli elevati gradienti termici ma non ha una buona resistenza agli shock termici.



Figura 1.5: Processo APS

- Electron Beam-Physical Vapor Deposition (EB-PVD), utilizza come fonte di calore degli elettroni per ottenere la deposizione di vapore. È un processo particolarmente adatto per componenti applicati su parti rotanti come le pale ad alta pressione delle turbine. All'interno di una camera a vuoto viene generato un fascio di elettroni da un cannone elettronico che viene focalizzato sul bersaglio attraverso un campo magnetico o elettrico. Il fascio ad alta intensità colpisce le particelle di ceramica (YSZ), andando a formare la nuvola di vapore che sarà depositata e condensata sulla superficie target. La microstruttura del rivestimento realizzato in EB-PVD è formata da un elevato numero di cristalli che vengono depositati in modo verticale, tra di loro separati, e fissati alla superficie tramite leganti chimici. Infatti, per poterlo far aderire allo strato di bond coat si deve utilizzare uno strato aggiuntivo di Thermally Grown Oxide (TGO). Questa sua microstruttura conferisce caratteristiche differenti rispetto al processo APS. È una tecnologia che viene impiegata in ambito aerospaziale, all'interno dei primi stadi di turbina che sono quelli soggetti ad elevati shock termici.
- Suspension Plasma Spray (SPS), è una tecnologia innovativa che utilizza delle particelle con dimensioni nanometriche e consente la deposizione di strati di TBC più sottili di quelli che si ottengono con il processo del APS. Il processo viene effettuato andando ad iniettare all'interno del plasma una sospensione di particelle, sciogliendosi all'interno del fascio si trasformano in sostanze liquide che andranno ad impattare, diffondersi e solidificarsi per andare a formare le

lamelle di cui sarà formato il rivestimento. Il rivestimento finale presenterà una struttura granulare

Tra i due processi descritti, le superfici rivestite con il processo EB-PVD hanno delle caratteristiche più elastiche che riducono gli stress interni, infatti resiste meglio alle deformazioni termiche quindi agli shock termici, oltre ad ottenere delle superfici lisce che non necessitano di ulteriori trattamenti di finitura. Invece, i componenti realizzati con il processo APS, non avendo il film di ossido tra i due strati, hanno caratteristiche più rigide che gli rende ottimi contro la resistenza termica ma hanno basse resistenze agli shock termici.

Per quanto riguarda il bond coat, invece, si tratta dello strato di rivestimento metallico che compone la parte più interna della TBC, ha spessori che vanno dai 150-250 μm . Ci sono varie tecniche di lavorazione e materiali che lo realizzano, ed a seconda delle caratteristiche finali che si vogliono conferire al componente, si scelgono i metodi più efficaci.

Uno dei processi più utilizzati per la realizzazione di questo substrato è l'HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), che tipicamente impiega materiali come MCrAlY, questa è una sigla che indica la superlega metallica utilizzata, ovvero: "M" si riferisce ad un metallo generico e tipicamente sono utilizzati il Nichel e/o Cobalto, il resto della sigla è composta dai simboli di Cromo, Alluminio e Ittrio. Il processo consiste in una tecnica di termospruzzatura, dove la polvere metallica viene fusa ed accelerata verso la superficie, raggiungendo velocità prossime a quelle del gas, ottenendo una buona adesione allo strato dove andranno a solidificarsi rapidamente dando luogo a superfici lamellari sovrapposte. Le temperature che si raggiungono con questo processo sono inferiori ai $3000^{\circ}C$, questo determina un limite di utilizzo per quanto riguarda i materiali altofondenti.

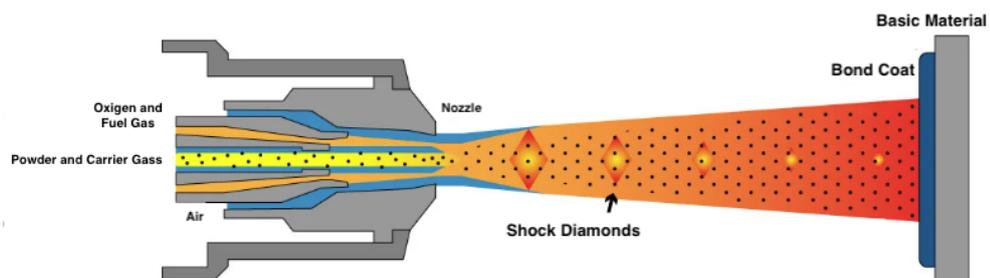


Figura 1.6: Processo HVOF

Dopo il trattamento HVOF i componenti offrono una migliore adesione tra lo strato del componente e il rivestimento superiore della TBC, acquisiscono bassi livelli di porosità, una resistenza all'ossidazione ed un'elevata rugosità superficiale.

L'alta rugosità superficiale è una caratteristica del rivestimento poiché è una copertura adesiva in cui andrà inserito ancora il top coat.

Oltre all'HVOF ci sono processi come VPS (Vacuum Plasma Spray), ma questi risultano più costosi ed hanno dei numeri produttivi decisamente più bassi.

Invece, un processo utilizzato in campo aeronautico è quello del platino alluminatura che produce la lega $PtAl$ mediante un processo galvanico. Il platino garantisce una buona protezione dall'ossidazione e corrosione tipica dei primi stadi delle turbine.

Dopo aver analizzato la composizione degli strati di TBC, le diverse lavorazioni e materiali utilizzati, si possono distinguere prevalentemente due configurazioni di rivestimento:

- **Aeronautica:** La TBC si applica al primo stadio delle palettature di turbina, si utilizza tipicamente il bond coat realizzato da $PtAl$, da uno strato ossidante di TGO ed, infine, lo strato di top coat di YSZ realizzato in EB-PVD. Questo processo genera una struttura che presenta un'ottima resistenza agli shock termici, in quanto si ottiene una TBC con proprietà elastiche in grado di resistere alle tensioni che nascono dai gradienti termici. Allo stesso tempo, però, hanno una bassa resistenza termica e non possono operare con temperature superiori a $1200^{\circ}C$ per tempi prolungati.
- **Turbogas e Aero-derivative:** In questo caso, la TBC si applica ad un numero di stadi maggiore poiché si tratta di macchine di maggiori dimensioni. Per questa categoria di turbine si vogliono ottenere delle prestazioni differenti, in quanto le pale devono essere operative ad alte temperature per molte ore di lavoro consecutive. La TBC, in questo caso, garantisce un'elevata resistenza termica alle alte temperature ma ha una bassa resistenza agli shock termici. È formata da un primo strato di $MCrAlY$ depositato sopra allo strato metallico della palettatura, in cui viene depositato il top coat di YSZ realizzato con tecniche APS. Questa procedura rende il materiale più denso con caratteristiche più rigide rispetto alla configurazione adottata in campo aeronautico.

1.6 Effetti della rugosità sulle prestazioni delle palette

La rugosità è un fenomeno superficiale dovuto all'irregolarità geometrica intrinseca o derivante da lavorazioni meccaniche che, esaminate a livello microscopico, si presentano sotto forma di creste e solchi con profondità e direzioni molto variabili. Queste microimperfezioni superficiali possono essere del tutto casuali, come nel caso di parti ottenute tramite fusione, oppure possono avere delle direzioni preferenziali

sulle quali si manifestano i difetti e questo si verifica dopo le lavorazioni meccaniche eseguite da utensili o durante l'asportazione di truciolo.

La misura di questa grandezza viene effettuata mediante dei rugosimetri, strumenti ad alta precisione che riescono a rilevare le creste superficiali dell'ordine dei micron. Questi strumenti sono formati da una punta, generalmente di diamante, la quale scorrendo sopra la superficie effettua un calcolo della rugosità in base allo spostamento verticale che ha avuto. È una misura di precisione e dev'essere realizzata ponendo la punta del rugosimetro in modo perpendicolare rispetto alla superficie da misurare. Tipicamente i risultati si calcolano in termini di R_a , ovvero la rugosità media aritmetica valutata lungo una certa lunghezza, questo parametro tiene conto del valore medio del livello superficiale espresso in micron.

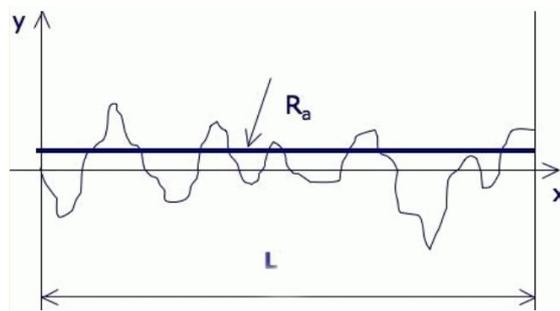


Figura 1.7: Rugosità calcolata in R_a

Come scritto in precedenza le lavorazioni meccaniche producono delle imperfezioni che si vogliono eliminare, infatti, in campo industriale, spesso sono previsti dei processi di finitura superficiale a fine lavorazione del pezzo proprio per ridurre gli effetti negativi derivanti da questi fenomeni.

Il grado di rugosità tollerato dipenderà dalla funzione che avrà il componente nelle condizioni operative in cui sarà destinato a lavorare.

In campo aeronautico, ad esempio, le pale delle turbine di alta pressione sono soggette a flussi di calore provenienti dalla camera di combustione, questi potrebbero portare con sé particelle di materiale solido che nascono dalla combustione incompleta. Queste particelle infinitesime si andranno a depositare sulle pale di turbina andando ad erodere le parti e depositarsi sopra le superfici, creando delle morfologie superficiali eterogenee, maggiore sarà il livello di rugosità presente sui profili alari e maggiore sarà l'aderenza di queste particelle corrosive.

Un altro aspetto negativo legato alla rugosità superficiale presente sulle palettature riguarda l'interazione tra lo strato limite che viene a generarsi quando il profilo è investito dal flusso, l'aerodinamica sarà fortemente influenzata dai livelli di rugosità presenti sulla superficie e porta a perdite di efficienza. Infatti, l'interazione tra flusso e superficie con irregolarità porta ad una non corretta aderenza della vena fluida e ad una conseguente distorsione del flusso una volta che supera la

palettatura, come si è già analizzato, le prestazioni finali dipendono dalla direzione che il fluido avrà all'uscita dello stadio.

Studi come [7], dimostrano che, all'aumentare del numero di Reynolds, si ha un aumento delle perdite aerodinamiche ovvero delle perdite di pressione totale lungo i vari stadi della macchina. Di conseguenza, la rugosità presente sui profili delle pale investite da un flusso con un'elevata velocità non può essere un parametro sottovalutato e trascurato.

L'irruvidimento della superficie oltre a causare perdite di natura aerodinamica, aumenta anche il trasferimento di calore sulla superficie della pala, questo porterà ad avere dei gradienti di temperatura che andranno a generare tensioni interne dannose per i componenti in quanto vanno a ridurre la vita operativa.

Nelle turbine a gas e nei propulsori aeronautici, dopo un numero di cicli prestabilito dal costruttore, la macchina dovrà effettuare una serie di riparazioni o di sostituzione della palettatura anche a causa di questi fenomeni.

Oltre a causare un deterioramento delle prestazioni da un punto di vista aerodinamico e termico, la rugosità superficiale accelera il degrado strutturale delle palette a causa di fenomeni legati alla fatica. I difetti superficiali possono causare effetti d'intaglio sulle superfici, andando ad accelerare ed innescare cricche che possono portare a rotture fragili dei componenti.

Ricerche come [8] hanno analizzato i comportamenti di provini metallici sottoposti a cicli di carico prima e dopo processi di finitura. Questi studi hanno mostrato come la rugosità ha un comportamento negativo sui componenti e pertanto dev'essere diminuita mediante processi di finitura.

Al fine di avere componenti performanti, che riescano a durare per tutti i cicli di lavoro previsti, si vogliono ottenere dei valori di rugosità bassi per le pale e i settori che dovranno formare le turbomacchine. I valori di rugosità richiesti possono variare molto a seconda del lato della pala, non è detto che il dorso abbia le stesse richieste di rugosità del ventre. In ogni caso, sono previste varie lavorazioni di finitura superficiale che permettono di migliorare gli effetti negativi discussi riguardanti la rugosità superficiale. Nel capitolo successivo verranno trattati i vari tipi di lavorazione, nello specifico in questa tesi è stato approfondito un nuovo processo per il campo aeronautico chiamato *Stream finishing*.

1.7 Turbine a gas Aero-derivate

I motori aeronautici, oltre all'applicazione riguardante la propulsione civile e militare, negli anni sono stati adattati a modelli che permettono la generazione di energia. Infatti, sono nati una serie di motori formati dal core centrale derivante da una configurazione aeronautica e, grazie a generatori di corrente collegati all'albero della turbina, riescono a generare energia elettrica.

Questo tipo d'impianti è stato realizzato per poter ovviare al problema delle fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica, infatti, la maggior parte delle fonti green che utilizziamo sono fortemente influenzate dalle condizioni meteorologiche.

Tipicamente questo tipo di macchine sviluppa una potenza che parte da poche decine fino ad arrivare a centinaia di MW, dipenderà dalle caratteristiche dell'impianto e dalla produzione di energia che si vorrà sviluppare. Sono impianti che hanno grandi dimensioni, proprio perché perdono il vincolo legato alla leggerezza che contraddistingue i propulsori aeronautici. Generalmente la turbina di alta pressione sarà formata da due stadi, mentre la turbina di bassa pressione avrà tipicamente cinque o sei stadi nei quali sarà possibile far espandere il gas per generare lavoro. Un altro vantaggio che hanno questo tipo di motori è la loro velocità di accensione, rispetto alle macchine cogenerative che impiegano anche alcune ore per l'accensione, queste sono operative in alcune decine di minuti.

Vengono riportati alcuni dati relativi a macchine sviluppate da **General Electric**:

- LM 2500: È una turbina a gas bialbero, hanno efficienze che arrivano fino al 41%, questa famiglia deriva dai propulsori aeronautici quali il CF6-6 e il TF39 che sono impiegati per jet di linea. possono raggiungere la piena potenza in meno di 10 minuti con efficienze che sono prossime a quelle di regime.
- LM 6000: Ha un range di potenza che va dai 40 ai 50 MW, le sue efficienze sono intorno al 42% con tempi di accensione che sono di circa 10 minuti. È bastato sul propulsore aeronautico CF6-80C2
- LMS 100: Questa macchina raggiunge potenze più elevate rispetto alle altre due, infatti si arriva ad oltre 100 MW con tempi che sono inferiori ai 10 minuti di accensione. Questa macchina raggiunge un'efficienza del 44%

Altre famiglie famose di aeroderivative sono prodotte dalla **Mitsubishi Power Aero**, questi prodotti derivano da motori di **Pratt and Whitney** come il PW4000, vengono riportati alcuni esempi nel seguito:

- FT8 SWIFTPAC: È un impianto piccolo e compatto, producono delle potenze che vanno dai 30 ai 60 MW, è formato da compressore assiale multistadio, un combustore cannulare, una turbina assiale multistadio. Ha dei tempi di azionamento che sono minori della decina di minuti con efficienze che sono intorno al 36%.
- FT4000 SWIFTPAC: È tra le unità con più grande capacità nel campo delle turbine a gas di derivazione aeronautica. Ha delle efficienze che si avvicinano al 41% sviluppando potenze che vanno dai 70 ai 140 MW. Ha dei tempi di avvio inferiori ai 5 minuti.

Capitolo 2

Processi di lavorazione finitura superficiale

Il processo di finitura superficiale è un elemento essenziale nell'ambito dell'ingegneria meccanica e nella produzione di componenti proiettati verso l'industria meccanica ed aerospaziale. Attraverso tecniche più o meno avanzate è possibile ottenere superfici che presentano proprietà meccaniche elevate ed esteticamente lucide che, nel tempo, possono essere resistenti alla corrosione e danneggiamenti rispetto a superfici non lavorate.

2.1 Processi tradizionali

I processi industriali per i trattamenti superficiali prevedono un'alterazione del primo strato del componente che ne determinerà maggiori proprietà meccaniche. Questi processi possono essere impiegati al fine di migliorare la resistenza all'usura, all'ossidazione e alla corrosione oltre che aumentarne la durezza e modificarne la conducibilità elettrica dei materiali conduttori. Spesso le lavorazioni meccaniche portano a sbavature e altri difetti superficiali che dovranno essere rimossi al termine di tutte le operazioni previste dalla manifattura.

Tra i principali sistemi di finitura meccanica si possono citare processi come:

- **Rettifica:** procedura che, mediante l'utilizzo di una mola o una smerigliatrice riesce ad effettuare una sgrossatura del componente. Utilizza la mola abrasiva come utensile da taglio andando poi a formare trucioli con la rimozione delle creste con elevata precisione. Rispetto ad una sgrossatura tradizionale la rettifica fa sì che tutti i residui di materiale in eccesso vengano rimossi per garantire un elevato grado di finitura. Non è un processo economico, si

esegue tipicamente su componenti che hanno un alto grado di finitura come su cuscinetti e su profili d'ingranaggi.

- **Sabbatura:** è un metodo veloce per la preparazione di superfici dei metalli che porta alla preparazione delle superfici che previene effetti corrosivi. La superficie trattata deve poter avere caratteristiche tali per cui possa garantire il corretto ancoraggio dei rivestimenti protettivi. Quindi risulta un processo fondamentale per componenti che dovranno effettuare il trattamento di coating.
- **Burratura:** una lavorazione tipicamente utilizzata per la rimozione meccanica di residui derivanti da lavorazioni per estrusione come lo stampaggio o la fusione. È utile per rimuovere le bavature e rifinire superficialmente un elevato numero di pezzi di piccole dimensioni, i quali vengono inseriti all'interno di una cesta contenente materiale abrasivo.

Questi ed altri processi tradizionali, attualmente ancora utilizzati in molte aziende del settore per i processi di finitura, hanno la problematica di essere lenti e, soprattutto nel caso di finitura manuale, non sempre permettono di ottenere dei risultati costanti e ripetibili nel tempo. Questo perché dipende molto dall'esperienza dell'operatore e dalla sua sensibilità nell'effettuare il lavoro, invece per i processi di finitura automatizzati si è visto come risultassero più precisi e con risultati, in termini di rugosità, migliori e ripetibili nel tempo. È stato stimato che le lavorazioni di finitura manuale effettuate con panno o dischi abrasivi, richiedano dei tempi di lavoro che sono di un ordine di grandezza superiore rispetto al processo che verrà analizzato nel prossimo paragrafo. Questo perché i macchinari di stream finishing permettono di lavorare più pezzi contemporaneamente quando hanno delle dimensioni contenute, inoltre, le alte velocità di rotazione della cesta permettono di effettuare il processo abrasivo in tempi ridotti dell'ordine dei minuti.

Con l'aumento della digitalizzazione sta crescendo notevolmente l'automazione di processi manuali con braccia robot all'interno delle aziende. È possibile andare a programmare la lavorazione in modo che un robot equipaggiato con un panno possa eseguire la lucidatura del componente, questa lavorazione presenterà una buona precisione ed uniformità su tutte le superfici comprese le piattaforme, anche dov'è presente uno strato di rivestimento ceramico, con la limitazione però di poter lavorare componenti di grandi dimensioni. Nel caso specifico di pale di turbine, questi meccanismi non sono indicati per lavorare profili alari provenienti dai jet derivative, nemmeno i primi stadi di turbogas, saranno invece efficaci quando si parla di geometrie con foglie che sono superiori ai 300 mm, in quel caso si vede come un braccio robot effettui delle lavorazioni estremamente precise. Quindi per componenti di piccole o medie dimensioni sarà indicata una lavorazione manuale oppure mediante una super finitura come andremo ad analizzare nei prossimi capitoli.

2.2 Stream Finishing

Al fine di ottenere lavorazioni di finitura di precisione con tempi e costi ridotti rispetto alle lavorazioni tradizionali si sono implementati dei nuovi metodi per la finitura superficiale, uno di questi è il processo di ***Stream Finishing*** (SF).

L'obiettivo di effettuare questa lavorazione risiede nel miglioramento generale delle proprietà del componente oltre ad incrementare la vita a fatica si ottengono dei benefici sugli effetti di usura relativi alla corrosione e all'ossidazione. SF è un processo che porta degli effetti benefici anche dal punto di vista delle tensioni residue, è un processo alternativo alla pallinatura, anche se entrambi vanno a migliorare lo stato tensionale interno dei componenti introducendo tensione residua di compressione, lo Stream Finishing in più agisce anche sulla rugosità superficiale. Infatti, questo processo modifica la meccanica superficiale con elevata qualità ed è utilizzato per andare a lavorare a livello superficiale i componenti, al fine di ottenere dei valori di rugosità ottimizzati, raggiungendo quindi dei valori finali che sono la metà rispetto ai processi tradizionali manuali in tempi inferiori. Per effettuare la lavorazione il componente viene immerso all'interno di una cesta contenente un materiale abrasivo, la quale ruota ad un'elevata velocità angolare creando un flusso che avvolge i componenti, raggiungendo velocità più elevate rispetto a processi tradizionali di vibrofinitura.



Figura 2.1: Stream Finishing

È un processo con pochi sprechi rendendo l'intero sistema rispettoso dell'ambiente, queste lavorazioni avvengono in un circuito chiuso in cui l'acqua che viene utilizzata per il ciclo di lavorazione viene raccolta e ripulita, è presente. Un sistema di pulizia centrifuga che separa i rifiuti solidi dall'acqua di processo per essere riutilizzata andando così ad ottimizzare sui costi e sprechi. L'unico elemento di scarto sarà una fanghiglia, derivante dallo sfregamento degli oggetti, sarà formato da un materiale solido composto dall'abrasione metallica e dall'usura del media. Sarà possibile lavorare pezzi di qualsiasi dimensione, da componenti molto piccoli

come gioielli o punte di utensili meccanici fino ad intere gear-box aeronautiche di grandi e articolate dimensioni andando ovviamente a variare le dimensioni della cesta contenente il media abrasivo.

I componenti vengono alloggiati con un mandrino all'interno della macchina, dove hanno la possibilità di essere orientati su diversi angoli al fine di andare ad operare al meglio su tutte le superfici e poter rimuovere la maggior parte delle creste ed imperfezioni presenti all'interno del componente. Questo è un aspetto fondamentale quando si hanno delle geometrie non simmetriche, poiché bisognerà riuscire a lavorare il componente in tutta la sua integrità senza formare delle zone d'ombra, ovvero zone nella quale il media non riesce a venire a contatto con la superficie e quindi non lavorare la zona.

Durante i trattamenti di finitura si determina l'asportazione di materiale introducendo effetti di deformazioni plastiche e tensioni residue di compressione all'interno del componente, si tratta di rimozione di materiale dell'ordine dei micrometri, infatti, questo processo per cicli brevi non va a rimuovere grosse quantità di materiale.

Durante studi relativi alla progettazione di macchine per la lucidatura del vetro a lastre, Preston ha proposto un'ipotesi di proporzionalità fra la rimozione di materiale Δm , la pressione di contatto p , la velocità relativa v_{rel} e il tempo di lavorazione t . [11]

Studi effettuati da Brocker et al. [12] non sono riusciti a confermare la validità della legge di Preston per i processi di vibrofinitura non guidati, processi di burattatura tradizionali. Si è comunque ipotizzato che esistessero delle relazioni, anche qualitative, tra la potenza equivalente $P = F_n \cdot V_{rel}$, dove F_n è la forza normale che agisce sul componente quando si effettua il processo di rimozione del materiale superficiale mentre v_t indica la velocità tangenziale. Sono presenti studi di vibrofinitura generali, come quelli di Hashimoto et al. [13] e Yabuki et al. [14], ma per lo SF interessano specialmente gli studi relativi alla vibrofinitura guidata e che descrivono i meccanismi per la rimozione di materiale superficiale e le caratteristiche, studi di Ciampini et al. [15] hanno contribuito a capire i fenomeni che agiscono all'interno di queste lavorazioni, come la misurazione delle forze di contatto [13],[12],[14],[15], misure sulle velocità [12], [15] e delle pressioni di contatto [14], oltre alle frequenze d'impatto [15].

Non si è ancora dimostrato che la relazione di Preston sia del tutto valida per i processi di finitura di massa e di stream finishing, ma all'interno di questo studio sono state trovate delle analogie rispetto a questa teoria.

Per la lavorazione di Stream Finishing, il flusso formato dal materiale abrasivo è influenzato dalla forma del componente da trattare, i parametri che vengono impostati per la sua immersione, oltre alla velocità di movimento del materiale ed al tempo di lavorazione, tutte analogie venute fuori anche negli studi [15].

Ci saranno quindi delle condizioni di contatto locali che non possono essere univoche

per ogni pezzo, ma queste dovranno essere studiate di volta in volta a seconda della geometria e dei relativi ingombri relativi a ciascun componente.

I vari parametri di progetto delle macchine di Stream Finishing verranno trattati nel capitolo successivo, non si entrerà nel dettaglio di come questi vadano ad influire sulla forza normale che agisce sul componente trattato, ma si trovano sicuramente delle correlazioni per la rimozione delle creste di rugosità su superfici posizionate in modo perpendicolare alla direzione del flusso abrasivo.

Zanger et al. [16] hanno effettuato studi approfonditi sulla correlazione causa-effetto che contribuiscono alla progettazione avanzata del processo per i trattamenti di Stream Finishing in modo generale. Hanno portato alla conclusione che la legge di Preston si è rivelata una buona misura qualitativa per la rimozione di massa, i parametri che influenzano la F_n sono principalmente l'angolo d'immersione, l'orientamento del pezzo e la profondità d'immersione. Questi andranno quindi ad influire sul carico meccanico che agisce sul componente e sull'efficienza della lavorazione. Per quanto riguarda la profondità d'immersione si vede che la F_n è una sua funzione lineare, questo perché c'è un aumento della pressione statica man mano che si scende in profondità, anche l'aumento della velocità di rotazione della cesta porta ad un incremento del carico agente sul componente questo perché sarà presente un aumento di energia cinetica delle particelle che verrà scaricata sul componente. Questi risultati portano ad ottenere delle zone all'interno della cesta nelle quali il componente lavorerà in modo più efficiente rispetto ad altre, in fase di progetto bisognerà analizzare la geometria e valutare la posizione in cui farlo lavorare al fine di ottenere una lavorazione ottimale.

Le richieste maggiori relative alle lavorazioni di finitura, nel campo meccanico, sono l'abbassamento del Ra, mantenimento di spessori richiesti, isotropia delle superfici, assenza di segni derivanti da rettifica residue e irregolarità di creste superficiali. Questo è un discorso legato a componenti meccanici classici, come ingranaggi e utensili vari, per i componenti aeronautici ci possono essere delle situazioni differenti. Studi in campo aeronautico sono stati svolti sugli ingranaggi utilizzati nella costruzione di aeromobili, questi hanno degli intervalli di tolleranza molto precisi e ristretti. Per poter garantire delle alte velocità di rotazione e trasmissione di potenze, questi componenti durante la loro vita operativa richiedono delle superfici estremamente lisce senza difetti derivanti da lavorazioni meccaniche, richiedono finiture dettagliate sui bordi e in tutte le zone di contatto.

All'interno dell'articolo [17] sono stati testati alcuni ingranaggi di medie dimensioni, si mette in risalto la semplicità del processo potendo inserire facilmente all'interno di un processo produttivo, si sono ottenuti dei buoni risultati sui fianchi dei denti raggiungendo condizioni isotrope e riducendo l'ondulazione dell'evolvente. Nei loro studi è stato utilizzato un materiale abrasivo di piccole dimensioni che ha permesso di lavorare in modo ottimale i fianchi dei denti portando ad una forma corretta gli spigoli vivi dei denti. Questo risultato mette in risalto l'importanza

del media che viene impiegato all'interno del processo di Stream Finishing, le varie tipologie verranno discusse nel capitolo successivo.

In questo progetto di tesi si sono utilizzati altri componenti aeronautici, verranno trattate palettature e settori aeronautici di turbine di alta e bassa pressione, i quali presentano delle lavorazioni completamente differenti rispetto ai classici ingranaggi meccanici che molto spesso è simmetrico con piccole dimensioni. In fase di produzione le pale delle turbine ad alta pressione effettuano vari processi tra cui la sabbiatura e il rivestimento con barriera termica del componente. Il processo di SF, quindi, per questi componenti, viene effettuato sullo strato di ceramica in TBC che riveste la palettatura e la cosa fondamentale oltre ad abbassare i livelli di rugosità è che non venga rimossa parte della TBC durante il processo di finitura, poiché questo porta alla non conformità del componente durante le ispezioni finali di collaudo.

Capitolo 3

Macchinario Otec

Il processo di *Stream Finishing* sta diventando sempre più diffuso a livello industriale poiché permette l'automazione della fase di finitura portando a risparmi considerevoli in termini di tempo e costi. Per questo motivo, l'azienda dove ho svolto la tesi, **ATLA S.R.L.**, ha deciso di investire risorse e ricerca in questo nuovo processo, acquistando presso l'azienda tedesca **Otec Präzisionsfinish GmbH** un macchinario di finitura superficiale in grado di processare pale di turbina di medie e piccole dimensioni.

Durante il mio periodo di tesi, ho avuto l'opportunità di poter effettuare una trasferta direttamente presso l'impianto OTEC di Straubenhardt nel sud ovest della Germania, in questa occasione si è svolta l'accettazione del nuovo impianto di Stream Finishing che, successivamente, è stato portato in azienda e su cui ho svolto in prima persona il mio progetto di tesi.

3.1 Descrizione generale macchinario

Il macchinario di Stream Finishing è un modello manuale che viene impiegato per la sgrassatura ad umido di difetti superficiali. È composto da due moduli comunicanti tra loro: il modulo principale contiene gli alloggiamenti per i componenti da lavorare e la cesta nella quale è presente la grana abrasiva, il secondo modulo invece, gestisce i liquidi di lavoro e tratta il materiale di scarto. Dato che questo macchinario lavora in un ciclo chiuso non necessita di rifornimenti d'acqua oltre a quelli effettuati inizialmente durante l'installazione, questo lo rende un macchinario con pochi sprechi e sostenibile per l'ambiente.

Il primo modulo, quello principale, è dotato di un disco contenente le quattro braccia dove verranno alloggiati i componenti da trattare, una cesta con il media e il computer di controllo principale. Il processo di superfinitura permette di effettuare il controllo del componente immerso nel media durante la lavorazione, per cui

le braccia in cui saranno inseriti i componenti avranno dei gradi di libertà che permetteranno il posizionamento dei componenti secondo i parametri impostati dall'operatore, al fine di lavorare in modo efficace.

La cesta sarà posta in rotazione durante il processo e porterà il media ad effettuare il lavoro abrasivo sull'oggetto trattato mentre l'acqua e gli scarti prodotti durante la lavorazione saranno appositamente filtrati attraverso una griglia interna e verranno asportati per essere gestiti nel secondo modulo.

Il computer principale controlla tutti i parametri relativi alla lavorazione, segnala eventuali anomalie riscontrate dai sensori interni ed è possibile interagire con esso mediante il display posto a bordo macchina.

Il secondo modulo gestisce il fluido che servirà durante la lavorazione, è un processo umido per cui, durante la lavorazione, verrà sempre immessa una miscela di acqua e sapone prelevata dal serbatoio. L'acqua ha la funzione di lubrificare il media, oltre ad essere anche utilizzata per la pulizia dei componenti in fase di post process. L'obiettivo del modulo secondario è quello di raccogliere lo scarto di produzione, pulirla con l'ausilio di un detergente e, mediante una centrifuga, separare il residuo del processo dall'acqua pulita in modo da poter essere riutilizzata durante il ciclo.

3.1.1 Modulo Principale

Questo modulo è il fulcro della macchina al cui interno avviene il processo e il controllo dell'impianto. È collegato al modulo secondario tramite un sistema elettronico che permette di segnalare eventuali anomalie riportate dai relativi sensori, inoltre, è dotato un sistema idraulico per il ricircolo del fluido che opera internamente alla macchina.

Dato che è un macchinario manuale richiede l'intervento di un operatore che inserisca il pezzo da lavorare, avvii la procedura, controlli il corretto funzionamento del processo e rimuova il componente finito una volta ultimata la lavorazione.

Prima di avviare il processo bisogna caricare all'interno del macchinario la vasca contenente il media adatto al materiale da lavorare, la scelta del media è uno dei parametri che influenzano il processo, dato che condiziona il tempo di lavorazione e la rugosità finale che si vuole ottenere. All'interno della macchina, sotto la posizione destinata alla vasca, è previsto un gancio che mantiene la cesta ancorata al macchinario, tale sistema di sicurezza è fondamentale data la velocità che essa raggiunge in fase di lavorazione.

Nella parte superiore è posizionato il disco contenente quattro mandrini previsti per il collocamento dei componenti che verranno sottoposti alla lavorazione. Ogni braccio sarà collegato ad un motore elettrico che permetterà la rotazione attorno



Figura 3.1: Modulo principale macchina OTEC SF

al proprio all'asse verticale, manualmente sarà possibile variare la distanza radiale rispetto al centro della cesta e l'angolo d'immersione nel media.

Il disco è controllabile dall'operatore mediante una pulsantiera posta frontalmente alla postazione di caricamento del macchinario, essa è costituita da due bottoni che, per questioni di sicurezza dell'operatore vanno premuti contemporaneamente, azionando la rotazione del disco in modo da portare il braccio in posizione di carico.

Per l'inserimento dell'oggetto nella sua posizione è previsto un sistema pneumatico che è possibile controllare mediante una pedaliera. Premendola si può aprire o chiudere il mandrino che permette il montaggio o lo smontaggio dell'holder contenente il pezzo da trattare.

Il macchinario è dotato di un sistema di misurazione laser collegato ad una scala graduata che permette all'operatore di verificare, una volta montato il componente sul braccio, la corretta profondità d'immersione che l'oggetto assumerà all'interno della vasca, tale parametro viene poi inserito manualmente durante l'impostazione del programma di lavorazione. Nel caso in cui il parametro fosse settato erroneamente, e quindi il pezzo dovesse risultare troppo profondo rispetto alla cesta, si creeranno dei punti di contatto tra la macchina e il componente che sta subendo la lavorazione, attivando il blocco d'emergenza del macchinario interrompendo il

processo.

Una volta settati i parametri e impostato il programma di lavorazione desiderato è possibile avviare il processo: le braccia verranno immerse all'interno della cesta rotante ed inizierà così la lavorazione.

In generale possiamo dire che all'interno del contenitore di lavorazione il componente lavorerà in modo differente a seconda della posizione in cui verrà collocato e delle forze che agiranno su di esso. La principale forza che interviene sul media è la forza centrifuga generata dalla velocità di rotazione della cesta, che tenderà a portarlo verso le pareti. Oltre all'effetto centrifugo, bisogna considerare che il peso del media influenza la lavorazione, infatti, la zona di maggiore profondità risulta quella dove il componente è soggetto a maggiori rimozioni di creste superficiali, per cui bisognerà individuare queste zone in cui collocare il pezzo da lavorare per ottenere in poco tempo delle superfici finite.

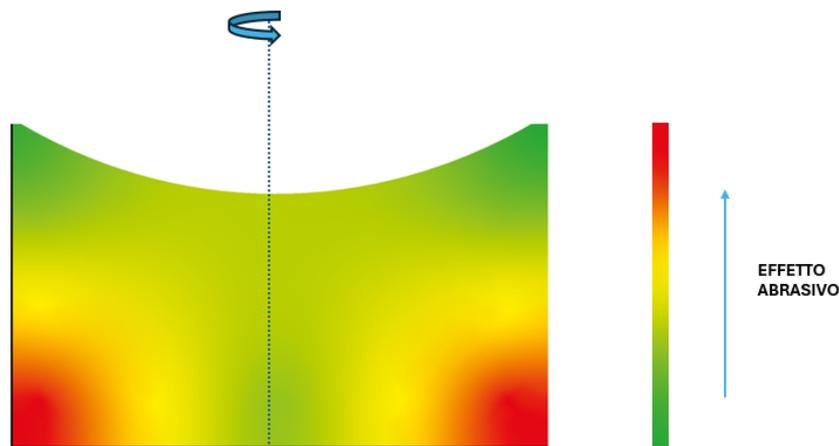


Figura 3.2: Analisi contenitore di lavorazione

In *Fig. 3.2* viene riportato un grafico raffigurante il contenitore di lavorazione e le zone maggiormente soggette a rimozione di materiale. Le zone in verde sono quelle dove l'inserimento del componente non provocherebbe molta erosione, mentre in rosso sono segnate le zone in cui l'abrasione superficiale risulta più forte. L'inserimento del componente in prossimità delle pareti sarà un ottimo punto dove far lavorare il componente perché il media sarà spinto in quella direzione, inoltre, più riuscirà a portarlo in profondità e più sarà aggressivo l'effetto abrasivo.

Durante la lavorazione sarà continuamente immessa dell'acqua pulita che arriverà dal modulo secondario allo stesso tempo verrà aspirata la fanghiglia dalla cesta del media e verrà trasportata al serbatoio dei liquidi di scarto. La cesta posta in rotazione imprime una forza centrifuga al media, il quale sarà spinto contro le pareti andando a creare delle zone in cui sarà maggiore l'aggressività abrasiva,

inoltre, grazie alla rotazione, il materiale di scarto sarà filtrato dalle griglie presenti nelle pareti della cesta in modo da riuscire a filtrare il fango dal media ancora integro.

I pezzi che si possono lavorare contemporaneamente possono essere anche inferiori a quattro, ma trattare un numero ridotto di componenti potrebbe alterare il risultato finale della lavorazione a causa della differente distribuzione di pressioni che il media esercita sui componenti.

A fine processo, il pezzo verrà estratto dalla cesta facendolo ruotare lentamente intorno all'asse verticale in modo da permettere la caduta del media residuo, e allo stesso tempo è previsto un lavaggio del pezzo mediante un sistema di docce posizionate lungo i bordi superiori della vasca. Sono previsti ai lati interni della macchina due pistole, una contenete aria per poter asciugare il pezzo bagnato, e un'altra contenente l'acqua per poter lavare ulteriormente il pezzo.

3.1.2 Media

La scelta del media, che avviene durante l'analisi preliminare nello studio di una nuova lavorazione, è un parametro fondamentale per l'intero processo in quanto influenzerà le caratteristiche finali che verranno raggiunte dalla superficie del componente al termine della lavorazione. Si possono trovare media di diverse geometrie, dimensioni e materiali, si sceglierà quindi la grana migliore a seconda dell'oggetto da lavorare e alla tipologia di materiale su cui bisognerà agire.

Un media di grandi dimensioni avrà un effetto abrasivo maggiore rispetto alla stessa grana con dimensioni inferiori, a parità di provino da lavorare e di tempo di lavorazione, ma avrà maggiori difficoltà a lavorare efficacemente nei raccordi il pezzo e quindi potrebbe lasciare alcune zone poco lavorate, in ombra, che presenteranno dei livelli di rugosità finali maggiori rispetto ad altre zone del componente.

È importante anche valutare la forma che avrà questo componente abrasivo, poiché bisogna considerare che, durante il processo, si andrà a consumare diventando sempre più piccolo e smussato rispetto alla condizione di partenza. Un media nuovo, che non ha mai effettuato nessuna lavorazione, avrà infatti una forza abrasiva maggiore rispetto ad un media che ha effettuato molti cicli di lavorazione. Per riuscire ad arrivare a risultato di lavorazione uniforme nel tempo, è consigliabile aggiungere poco alla volta nuovo media in modo da avere una giusta uniformità di dimensioni e durezza del composto totale presente all'interno della cesta.

Vengono riportate nel seguito alcune tipologie di media impiegate per le lavorazioni ad umido nel processo di Stream Finishing.

Ceramico Abrasivo

Sono degli abrasivi adatti a lavorare le leghe d'acciaio e alluminio, hanno la caratteristica di avere un'alta densità e alta durezza. Questa tipologia di media è adatta a lavorare sia materiale ceramico che materiale metallico, non è sicuramente tra i materiali più aggressivi presenti in commercio ma è utilizzabile per molte applicazioni.



Figura 3.3: Media ceramico abrasivo

Abrasivi Plastici

Questa tipologia è molto impiegata per superfici che partono da bassi valori di rugosità superficiale, hanno la caratteristica di lasciare delle superfici praticamente lucide. Questa tipologia di media ha una forma conica o piramidale che può avere durezza anche elevata che permette di ottenere delle superfici con valori di rugosità minimi il processo di Stream Finishing.



Figura 3.4: Media plastico abrasivo

Abrasivi per microfinitura

Sono degli elementi dai bordi sottili in ceramica sinterizzata, molto compatti e duri, ideali per la molatura di precisione e la lucidatura di pezzi in acciaio temprato. Sono molto resistenti all'abrasione, riescono a operare per molti cicli di lavoro, ed in

molti casi permettono di ottenere buoni risultati anche nella lavorazione di fessure, ingranaggi e sistemi di ruote dentate. Non hanno una forza abrasiva elevata come accade con i media plastici.



Figura 3.5: Media abrasivo per microfinitura

Sfere in ossido di zirconio

Sono delle sfere molto dure, e quindi di lunga durata. Hanno un'ottima efficacia lucidante, sono tipicamente impiegate nell'industria della gioielliera.

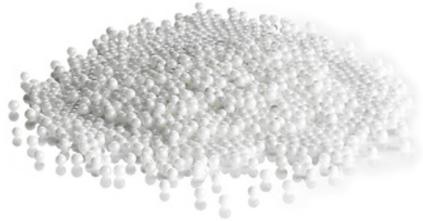


Figura 3.6: Media in ossido di Zirconio

Abrasivi in Acciaio Inox

Sono delle barrette di metallo, tipicamente di acciaio Inox, che vengono utilizzate per la lucidatura magnetica. Viene utilizzato per lavorare componenti non magnetici, ha degli effetti abrasivi ridotti rispetto ai precedenti, tipicamente impiegato nel campo dei gioielli per rimuovere strati ossidati dei materiali metallici.

3.1.3 Modulo Secondario

Il modulo secondario dell'impianto è legato alla raccolta dell'acqua e contiene due sotto moduli: una centrifuga ed un serbatoio per il contenimento dell'acqua pulita e dell'acqua proveniente dal modulo principale.



Figura 3.7: Media in Acciaio Inox abrasivo



Figura 3.8: Centrifuga macchina OTEC

In un primo scompartimento del serbatoio viene raccolto il residuo di fanghiglia proveniente dal modulo principale, questo viene messo in contatto con un detergente, ed il composto che si formerà verrà convogliato all'interno della centrifuga.

La centrifuga servirà per separare l'acqua adesso pulita dallo scarto che verrà raccolto in un apposito cassone, il liquido pulito verrà inviato in un altro scompartimento del serbatoio per essere pronto ad essere riutilizzato dal macchinario.

In *Fig. 3.8*, viene riportato il modulo secondario nel suo insieme, dove a sinistra si vede la centrifuga mentre a destra è raffigurato il serbatoio. La macchina opera in un ciclo chiuso, quindi il liquido verrà ripulito e riportato nel modulo principale per essere utilizzato durante il processo. È previsto un sensore che controlla il quantitativo di liquido presente all'interno del serbatoio, segnala se la capienza è nella norma, se è carente oppure se è eccessiva in questo ultimo caso sarà necessario espellerla oppure nel primo caso bisognerà aggiungere del liquido nuovo, al fine di avere un corretto funzionamento.

3.2 Parametri di progetto lavorazione

Per il processo di Stream Finishing, legato alle caratteristiche di questa macchina, si possono riassumere i parametri di progetto che dovranno essere valutati quando si realizzerà un nuovo programma di lavorazione:

- **Velocità di rotazione della cesta:** Questo macchinario ha una velocità massima di 100 rpm, ma per i test da noi effettuati è stata utilizzata una velocità più bassa, per i componenti più piccoli si è utilizzato una velocità di 60 rpm mentre per i pezzi di maggiori dimensioni si è abbassato ulteriormente questo valore a circa 40 rpm.
- **Tempo del processo:** Con questo parametro si intende il tempo effettivo di lavorazione del pezzo all'interno del media. Per le prime prove sono stati impostati anche dei tempi lunghi per andare a fare dei test di resistenza delle attrezzature. Per i cicli di lavoro per un ambito produttivo non si prevedono dei tempi di lavorazione molto lunghi, non superiori alla decina di minuti.

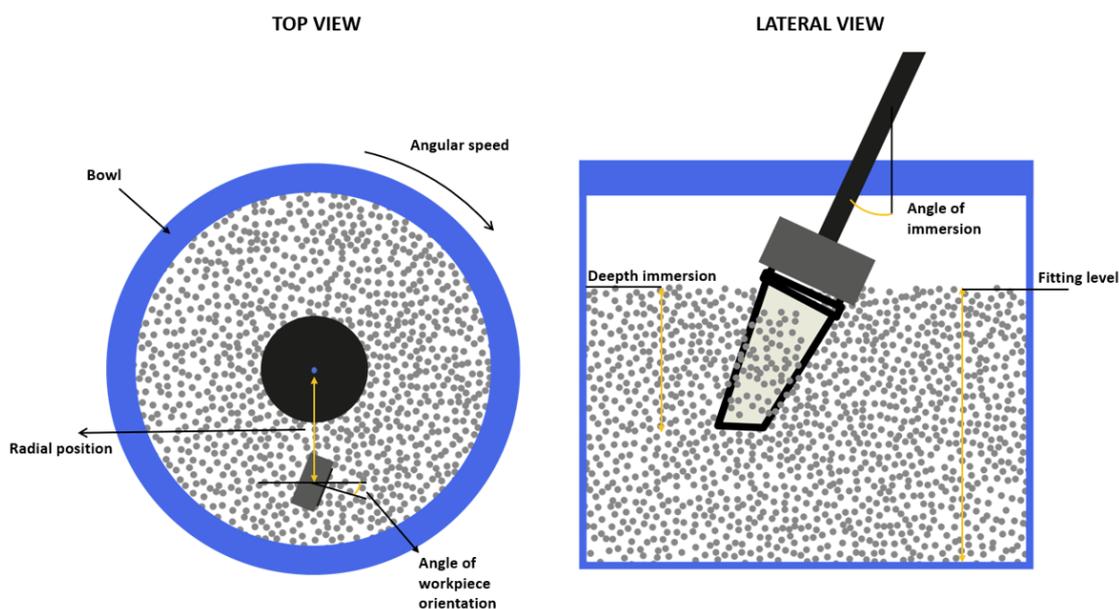


Figura 3.9: Parametri di progetto

- **Profondità d'immersione:** La profondità in cui è immerso l'oggetto è un parametro fondamentale per la lavorazione. Per effettuare le lavorazioni in modo efficace si deve portare il componente il più possibile in profondità. Bisogna tenere in considerazione che per pezzi molto alti non si avranno delle lavorazioni uniformi poiché non tutta la parte sarà alla massima profondità,

inoltre, ci sarà un limite di altezza dovuto alla dimensione della cesta e dal media che è possibile inserire al suo interno.

- **Angolo di orientamento del pezzo:** È l'angolo in cui si può posizionare il pezzo rispetto al flusso del media. Durante la lavorazione è possibile variare questo valore in modo da poter andare a lavorare il componente in tutti i suoi punti e ottenere così un componente che abbia una rugosità il più possibile uniforme.
- **Regolazione radiale:** Questo parametro permette di regolare il componente in modo differente rispetto al centro della cesta. Per ottenere delle lavorazioni efficaci si deve posizionare il pezzo il più possibile in prossimità delle superfici laterali della cesta, poiché durante la lavorazione il media sarà spinto contro le pareti a causa della forza centrifuga dovuta all'alta velocità di rotazione, questo porterà ad avere delle pressioni maggiori sulle superfici del pezzo e di conseguenza degli abbattimenti di rugosità in tempi minori.
- **Angolo d'immersione:** È un parametro utile quando si devono lavorare degli oggetti che hanno ingombri verticali maggiori rispetto all'altezza effettiva del media, per questa tipologia di macchina l'altezza del media è intorno ai 250 mm. Come è stato detto in precedenza si tenderà a inserire il componente in prossimità delle pareti della cesta dove il livello del media tenderà ad alzarsi quando ruota ad elevate velocità. In ogni caso sarà possibile inclinare il pezzo rispetto alla sua posizione verticale, di un angolo di 45° , questo permetterà di lavorare componenti anche maggiori di 300 mm, considerando però che non tutto il componente sarà a diretto contatto con il materiale abrasivo.

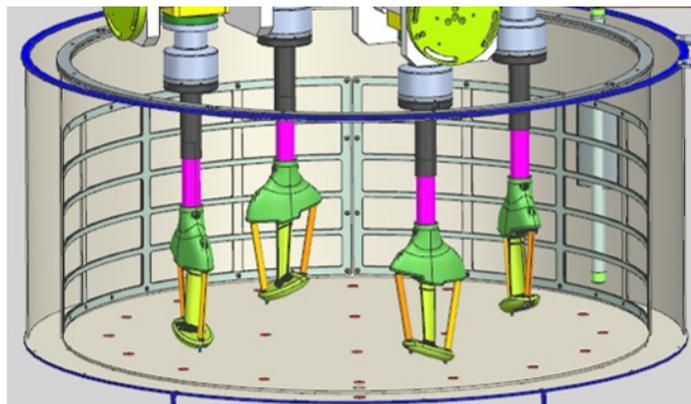


Figura 3.10: Macchina con componenti immerse a pieno carico

Viene riportata in *Fig. 3.10* la rappresentazione del macchinario Otec utilizzato, dove i componenti sono stati inseriti all'interno del contenitore di lavorazione. In questo caso si sono inseriti all'interno della macchina tutti e quattro i componenti, immersi alla massima profondità possibile per la geometria in questione, con l'angolo d'immersione e l'angolo d'orientamento nulli. Con questo tipo di geometria il livello del media, di altezza 250 mm, riesce a contenere il componente completamente e di conseguenza si riuscirà a lavorare dal tip fino all'hub della paletta senza troppi problemi.

Capitolo 4

Studio parametri macchina in ATLA

Dopo aver descritto il processo di Stream Finishing e il macchinario che lo esegue, si procede andando ad analizzare nel dettaglio le prove sperimentali effettuate all'interno dell'azienda **ATLA S.R.L.** durante il percorso di tesi.

Nel corso di questi mesi ho realizzato una serie di prove studiando i vari parametri della macchina, analizzando i loro effetti, sia singolarmente sia combinati, sui valori finali di rugosità raggiunti dalle palettature di turbina testate.

Questo studio servirà in futuro all'azienda per poter processare in un ambiente produttivo nuove geometrie che, dopo aver effettuato un'opportuna analisi del pezzo e la realizzazione di un'apposita mascheratura di supporto, potranno eseguire la lavorazione di finitura. L'obiettivo sarà quello di poter processare il maggior numero di componenti all'interno di questa macchina e di conseguenza aver ben chiaro il modo in cui agiscono i singoli parametri per poter sviluppare al meglio i programmi. Da questo paragrafo a seguire, le caratteristiche dei provini utilizzati, i materiali impiegati per eseguire le lavorazioni e i dati numerici ottenuti saranno alterati rispetto a quelli originali poiché sono informazioni sensibili e strettamente riservate all'azienda che non potranno essere divulgati.

4.1 Descrizione del problema

Le prove sperimentali svolte avranno l'obiettivo di analizzare come varia la rugosità lungo la superficie del profilo di una paletta quando viene messa a lavorare all'interno della macchina, al fine di poter verificare i vantaggi di utilizzare il processo di Stream Finishig (SF). Inizialmente per le prime prove di qualifica è stata utilizzata una geometria di piccole dimensioni, mentre geometrie più grandi e complesse

che vengono regolarmente riparate dall'azienda verranno trattate e descritte nel capitolo successivo.

Per poter essere fissate all'interno del macchinario le pale necessitano di un holder e una mascheratura dedicata, quest'ultima serve per poter proteggere le parti che non sono interessate dal processo e varia a seconda della geometria e del peso della pala. L'holder, il componente che sorregge la pala e la maschera, è stato progettato e realizzato da ATLA, viene ancorato alla macchina mediante una chiusura pneumatica gestita manualmente con una pedaliera dall'operatore. Questo componente non sarà mai a diretto contatto con il media abrasivo, di conseguenza è stato customizzato in materiale metallico, soluzione che è sicuramente efficiente dal punto di vista dell'impiego poiché ha delle vite operative molto lunghe, resiste bene alla corrosione dell'acqua, però, avendo dei pesi massimi applicabili per ogni braccio, è necessario che l'insieme di maschera, holder e pala non ecceda i limiti sostenibili. Un prossimo step futuro potrà essere quello di realizzare l'holder con altri materiali al fine di ottimizzare il peso complessivo soprattutto quando i componenti da lavorare avranno un peso considerevole, quindi il peso totale sarà un fattore critico per la tenuta del serraggio.

Le mascherature di supporto sono state realizzate mediante un processo additivo, il materiale utilizzato è un nylon che presenta delle buone proprietà meccaniche come la tenacità a frattura e la resistenza a trazione ed inoltre, ha delle proprietà elastiche che lo portano a subire delle flessioni senza giungere subito a rottura. Altra caratteristica positiva è che presenta una bassa conduttività termica, con basso assorbimento d'acqua, quest'ultima costituisce una caratteristica perfetta per un processo ad umido come quello effettuato per lo SF.

In *Fig.4.1* viene riportata una schematizzazione di un attrezzaggio macchina, in questo modo il provino è pronto per essere messo ad effettuare il processo di SF e quindi abbattere i suoi livelli di rugosità superficiale.

Gli obiettivi di rugosità da raggiungere sui provini rappresentano un parametro definito dalle specifiche tecniche, tale caratteristica dipende dalla tipologia di pala e dal materiale di cui sono rivestiti i componenti. Questo dovrà essere il punto di arrivo che bisognerà ottenere per poter soddisfare i requisiti e poter andare ad automatizzare questo processo che attualmente è svolto manualmente. Per ogni palettatura, quindi, bisognerà studiare quale sia il processo ottimale per poter poi essere congelato ed utilizzato dagli operatori nel contesto di un processo produttivo.

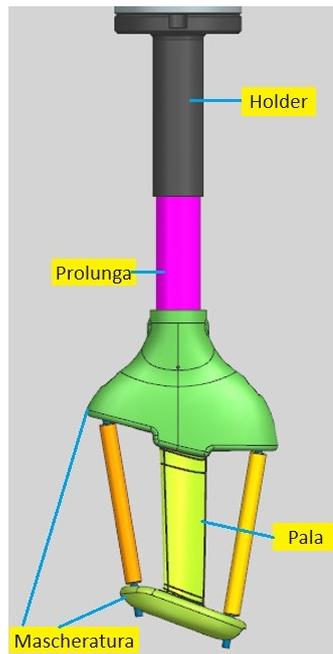


Figura 4.1: Prototipo mascheratura

Nel progetto sviluppato le misure di rugosità superficiale sono state effettuate mediante due differenti rugosimetri presenti all'interno della ditta, ovvero:

- **SAMA tools SA6240:** un rugosimetro in grado di misurare con buona precisione superfici di medie e grandi dimensioni. Le prime palette utilizzate presentavano una complessità nella misurazione diretta dei valori con questo strumento, soprattutto sul bordo d'entrata lato ventre poiché risultava una superficie concava. È dotato di una risoluzione di $0,05 \mu m$, inoltre, presenta la possibilità di misurare i valori in R_a, R_q, R_z e R_t , ma per la trattazione svolta all'interno di questa tesi si è utilizzata solo la misurazione in R_a . Questo strumento è stato utilizzato per la misurazione di alcuni punti in cui era possibile utilizzarlo come confronto dei risultati ottenuti mediante l'altro rugosimetro, che invece è impiegato maggiormente nel seguito per le misure di rugosità su pale di più grandi dimensioni che verranno analizzate nel *Capitolo 5*.
- **RT10:** Questo tipo di rugosimetro è utilizzato dall'azienda nei reparti di laboratorio, a differenza del precedente, con questo strumento si è in grado di andare a misurare anche delle superfici con concavità. Bisogna notare che per la misura della rugosità la superficie dev'essere il più planare possibile e, inoltre, la punta dello strumento dev'essere il più possibile perpendicolare



Figura 4.2: Rugosimetro SAMA tools

rispetto al piano di misura. Quindi, andando a misurare delle superfici concave, si ha comunque probabilità di ottenere dei valori che potrebbero non essere totalmente precisi. Lo strumento in questione ha la possibilità di poter misurare fino a 11 calcoli di rugosità differenti, con una risoluzione di $0,001 \mu m$, quindi con un livello di precisione maggiore rispetto al precedente.



Figura 4.3: Rugosimetro RT10

Per poter avere delle superfici ruvide in modo più o meno uniforme ed innalzare il valore della rugosità superficiale, i provini da inserire all'interno della macchina sono stati preparati appositamente mediante un processo di sabbiatura utilizzando: corindone con grana 30 e un ossido di alluminio tipicamente utilizzato per i processi di preparazione del rivestimento di palette. Avendo a disposizione delle superfici ruvide è stato possibile analizzare il funzionamento del macchinario e come i parametri di progetto influiscano sulle superfici esposte al flusso abrasivo.

4.2 Studio degli effetti dei parametri di progetto

I primi test sono stati effettuati al fine di provare come i vari parametri di lavorazione della macchina incidessero sulla rimozione della rugosità superficiale dei componenti trattati. Inizialmente sono stati eseguiti alcuni test nei quali si sono realizzati programmi con caratteristiche differenti tra loro, ma con il parametro in comune della medesima durata di processo. Tale prova è stata svolta per verificare, in un tempo non troppo lungo, quali parametri di progetto fossero più influenti dal punto di vista della rimozione della rugosità superficiale e vedere quale processo risultasse più rapido ai fini di abbattere i tempi produttivi. Al termine di ciascun ciclo sono stati presi i valori di rugosità ottenuti in modo da poter poi successivamente fare un'analisi comparativa dei risultati tra i vari processi.

I test realizzati sono stati i seguenti:

- **Pala ferma soggetta ad un flusso che varia la sua direzione:**

La paletta è stata immersa perpendicolarmente all'interno della macchina, quindi tenendo nullo l'angolo d'immersione, e tenuta ferma mentre il media scorreva attorno alla superficie. L'angolo con cui è stata orientata la pala è stato scelto in modo che il flusso fosse parallelo al leading edge. Il contenitore di lavorazione è stato fatto ruotare con una velocità costante pari a 35 rpm, per metà tempo in senso antiorario e per l'altra metà tempo in senso orario. Vengono riportati in tabella i parametri che sono stati impostati per eseguire la lavorazione:

Angolo 1	Profondità	Angolo d'immersione	Velocità angolare Cesta
35°	700 mm	0°	± 35 rpm

Tabella 4.1: Parametri di progetto lavorazione 1

Con questo programma sono stati svolti più cicli di lavorazione, il primo da 1 minuto e altri cinque cicli da 2 minuti ciascuno, per giungere al tempo totale di lavorazione prefissato.

- **Flusso perpendicolare al Leading Edge e Tailing Edge:**

Per effettuare questa lavorazione sono stati scelti due angoli di riferimento, il primo è stato scelto in modo da avere il flusso parallelo al Leading Edge, ed un secondo angolo in modo che il flusso fosse parallelo al Tailing Edge. Questo programma è stato realizzato tenendo il componente per metà del tempo nella prima posizione e per metà del tempo nella seconda. La cesta è stata fatta ruotare sempre a 35 rpm in senso orario senza andare a variare la sua direzione. Si riassumono in tabella i parametri utilizzati per questa lavorazione:

Angolo 1	Angolo 2	Profondità	Angolo d'immersione	V angolare Cesta
35°	185°	700 mm	0°	35 rpm

Tabella 4.2: Parametri di progetto lavorazione 2

Anche in questo caso è stato svolto il primo test da 1 minuto e i successivi da 2 minuti.

- **Pala tenuta in rotazione continua all'interno del media:**

In questo caso non si è posizionata la pala secondo un angolo di riferimento fisso, ma si è deciso di tenerla in continua rotazione rispetto al suo asse verticale una volta immersa dentro la cesta, facendola ruotare con una velocità angolare di 25 rpm. La rotazione della cesta è stata programmata in modo che lavorasse per metà tempo in senso antiorario e per l'altra metà in senso orario con una velocità di rotazione pari a 35 rpm.

V angolare pala	Profondità	Angolo d'immersione	V angolare Cesta
25 rpm	700 mm	0°	± 35 rpm

Tabella 4.3: Parametri di progetto lavorazione 3

I valori di rugosità sono stati presi su vari punti all'interno della superficie, nello specifico sono stati presi sei punti sul dorso e altri sei punti sul ventre, dividendoli in tre punti lungo il LE e tre punti lungo TE. Si riporta in *Fig.4.4* un esempio del campione utilizzato per le prove sperimentali.

Nelle *Tabelle 4.4, 4.5, 4.6* sono stati riportati i valori di rugosità misurati sui provini. I dati di "Pre process" sono riferiti al provino subito dopo aver effettuato il processo di sabbiatura, mentre i risultati "Post Process" sono quelli ottenuti al termine dell'intero ciclo di lavorazioni. Viene riportata anche la variazione ottenuta tra prima e dopo la lavorazione, ovvero il "Delta totale", questo costituisce il parametro più significativo poiché permette di visualizzare qual è stato l'effetto del processo in quella zona del componente, se abbia subito o meno gli effetti abrasivi del media.

Per la prima lavorazione si sono ottenute delle variazioni di rugosità di circa 2 Ra su tutti i punti, sia sul lato dorso sia sul lato ventre, questo significa che la lavorazione ha avuto effetto su tutto il profilo alare. Il punto dove si è osservata una rimozione maggiore in termini di Ra è il punto 4, ma coincideva anche con il punto nel quale si era registrato il valore maggiore di rugosità iniziale. Il punto 2 è quello che ha raggiunto il valore più basso, probabilmente perché era una zona che è sempre stata esposta all'abrasione del media. Al contrario, il punto 10 è quello

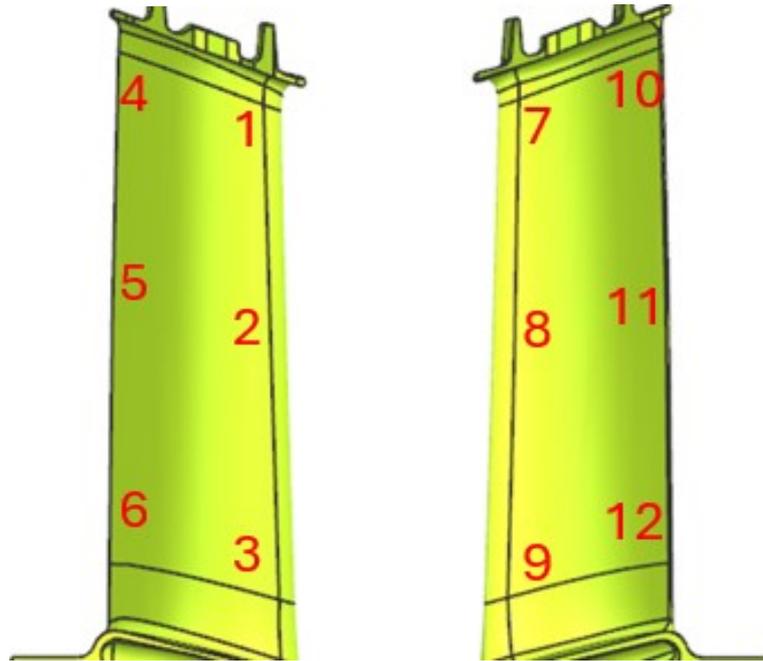


Figura 4.4: Provini utilizzati per le prove sperimentali

che ha subito una variazione inferiore a tutti gli altri punti, probabilmente il punto risultato maggiormente in ombra rispetto a tutti gli altri.

Questa lavorazione ha portato una grossa riduzione delle creste sul LE, qui il profilo subisce l'effetto del media il modo parallelo per la metà del tempo di lavorazione. Andando poi a cambiare il verso di rotazione della cesta, e non andando a modificare la posizione del profilo, questa condizione non si verifica sul TE dove si hanno dei valori finali di rugosità maggiori rispetto al LE.

	Dorso						Ventre					
	LE			TE			LE			TE		
Punti sulla superficie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rugosità Pre Process	4.05	4.00	4.50	6.20	5.20	5.20	3.95	4.95	5.00	3.35	4.80	5.45
Rugosità Post Process	2.10	1.50	2.85	2.50	2.60	3.15	2.00	2.50	2.55	2.20	2.17	2.70
Delta totale	1.95	2.50	1.65	3.70	2.60	2.05	1.95	2.45	2.45	1.15	2.63	2.75

Tabella 4.4: Misure di rugosità della lavorazione 1

Nella seconda lavorazione, *Tab 4.5*, si sono ottenuti dei valori finali che sono molto simili rispetto al caso precedente, questo perché per metà del tempo la

lavorazione è risultata identica. In questo caso si è cercato di mantenere sempre il flusso parallelo alla superficie del componente, in un primo momento parallelo al LE e successivamente andando a ruotare il componente e renderlo parallelo al TE, ottenendo così dei valori di rugosità più uniformi.

Lasciando la pala ferma con il flusso parallelo si vede come la zona che lavori maggiormente sia quella del LE che risulta avere una curvatura maggiore rispetto al TE, che anche se rimane parallelo allo stesso modo risulta meno lavorato perché approssimabile ad una lamina senza curvatura.

	Dorso						Ventre					
	LE			TE			LE			TE		
Punti sulla superficie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rugosità Pre Process	4.20	4.20	4.40	5.50	4.80	4.30	4.90	4.90	4.30	4.20	3.80	3.70
Rugosità Post Process	1.78	1.44	2.39	2.24	2.50	2.95	2.43	2.93	2.00	2.00	2.65	2.70
Delta totale	2.43	2.76	2.01	3.27	2.30	1.35	2.47	1.97	2.30	2.20	1.15	1.00

Tabella 4.5: Misure di rugosità della lavorazione 2

Con l'ultima lavorazione, *Tab 4.6*, si è utilizzato un approccio del tutto differente poiché la paletta non ha mai avuto una posizione fissa rispetto al flusso. Il componente è stato investito per metà del suo tempo in senso orario e per il restante tempo in senso antiorario, ruotando continuamente lungo il suo asse verticale con una velocità costante. Anche in questo caso si sono ottenuti dei delta maggiori rispetto alle altre due lavorazioni su alcuni punti specialmente del lato dorso, al contrario, sul lato ventre si hanno delle variazioni totali che sono inferiori. Il fenomeno che salta in primo piano è che sembrerebbe lavorare molto sul tip soprattutto nel lato dorso, questo potrebbe essere dovuto al senso di rotazione costante, come se si verificasse un avvitemento all'interno del media che porta ad una riduzione maggiore delle creste di rugosità in quei punti.

	Dorso						Ventre					
	LE			TE			LE			TE		
Punti sulla superficie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rugosità Pre Process	4.55	5.20	4.30	5.10	3.60	5.20	4.90	4.85	4.10	3.90	4.00	4.40
Rugosità Post Process	1.60	2.00	2.70	1.50	2.50	2.30	2.97	3.23	2.83	2.60	2.45	2.60
Delta totale	2.95	3.20	1.60	3.80	1.10	2.90	1.93	1.62	1.27	1.30	1.55	1.80

Tabella 4.6: Misure di rugosità della lavorazione 3

Dopo aver effettuato questi primi test sperimentali si possono analizzare i primi risultati che verranno riassunti nei seguenti qui nel seguito:

- I punti maggiormente lavorati risultano quelli sul tip, questo è dovuto alla posizione in cui è inserita la paletta dentro la macchina. Il tip risulta la zona più profonda, di conseguenza una prima considerazione importante da fare è che più il componente riesce ad andare in profondità e più riuscirà a lavorare ottenendo superfici più lisce;
- I punti maggiormente lavorati inserendo il profilo parallelo al flusso risultano quelli sul leading edge. Probabilmente questo è dovuto alla sua curvatura che, quando viene investita dal flusso, ha una maggiore superficie di contatto e di sfregamento rispetto al bordo d'uscita che, in posizione parallela al flusso, si può approssimare ad una lamina. Queste considerazioni hanno portato a concludere che le superfici maggiormente lavorate risultassero quelle perpendicolari al flusso del media;
- Esistono delle zone più esposte, ovvero superfici che ricevono il media in modo diretto, queste zone subiscono delle riduzioni di rugosità più consistenti rispetto ad altre che risultano essere in "ombra". Bisognerà, quindi, in base alle caratteristiche che si vogliono ottenere e la geometria del componente, trovare delle angolazioni tali per cui si vadano a lavorare tutte le superfici in maniera uniforme.

I risultati ottenuti da queste prime prove hanno condotto verso le lavorazioni successive, al fine di confermare queste prime ipotesi oppure smentirle. Dopo aver preparato nuovamente i provini si è scelto di impostare altre tre lavorazioni, ovvero:

- **Dorso e ventre statico;**
- **Dorso e ventre dinamico;**
- **Rotazione Continua Inclinata (RCI);**

Le prime due lavorazioni verranno analizzate nella sezione successiva, mentre qui di seguito verranno discussi i risultati ottenuti per la rotazione continua con il braccio del macchinario non posizionato in modo verticale. Durante questo tipo di lavorazione si è dato un angolo d'immersione al componente ed è stato mantenuto in continua rotazione attorno al suo asse verticale con una velocità angolare costante. Vengono riportati in *Tab. 4.7* i dati impostati per formare il programma della lavorazione RCI:

V angolare pala	Profondità	Angolo d'immersione	V angolare Cesta
15 rpm	700 mm	7.5°	-35 rpm

Tabella 4.7: Parametri di progetto lavorazione RCI

Questo tipo di lavorazione è stata scelta per andare ad osservare gli effetti che si hanno quando il componente non viene immerso perpendicolarmente, inoltre, si vuole osservare se in questa posizione si arrivi a lavorare maggiormente l'hub della palettatura che nelle precedenti lavorazioni è risultata una zona difficile da raggiungere per il media poiché ha sempre mantenuto livelli di rugosità finali più alti. Sono riportati in *Tab. 4.8* i dati che sono stati raccolti sulle misure effettuate prima e dopo la lavorazione ed i relativi delta della tra il valore iniziale e quello finale. La maggior rimozione di creste superficiali per la seguente lavorazione si è misurata sul lato dorso verso il TE, questa è stata una zona sempre esposta al flusso di media, al contrario del ventre che in generale è rimasto più in ombra.

I risultati di rugosità misurati in questa prova sono stati confrontati con quelli della stessa lavorazione effettuata con un angolo d'immersione nullo, ovvero la lavorazione 3 descritta nella *Tab. 4.3*, i dati di confronto sono stati presi dopo lo stesso intervallo di tempo di lavoro, mentre quelli riportati all'interno della *Tab. 4.6* erano relativi alla lavorazione finale con un tempo di lavoro maggiore. Si è potuto eseguire il confronto anche perché i dati misurati in partenza risultano simili nei vari punti della superficie, è stato comunque valutato il delta tra le due lavorazioni che hanno ottenuto in quell'intervallo temporale, ed i dati sono stati riassunti nella *tab. 4.9*.

	Dorso						Ventre					
	LE			TE			LE			TE		
Punti sulla superficie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rugosità Pre Process	4.45	4.90	5.20	4.85	4.55	4.55	6.45	5.15	5.55	4.75	4.40	5.00
Rugosità Post Process	3.10	2.50	4.10	2.30	2.10	2.30	4.60	3.65	4.30	3.70	2.60	3.70
Delta totale	1.35	2.40	1.10	2.55	2.45	2.25	1.85	1.50	1.25	1.05	1.80	1.30

Tabella 4.8: Misure di rugosità della lavorazione RCI

	Dorso						Ventre					
	LE			TE			LE			TE		
Punti sulla superficie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Delta Lavorazione 3	2.52	3.20	1.33	3.57	1.60	2.75	1.67	1.52	1.00	1.37	0.97	1.40
Delta lavorazione RCI	1.35	2.40	1.10	2.55	2.45	2.25	1.85	1.50	1.25	1.05	1.80	1.30
Differenza	1.17	0.80	0.23	1.02	-0.85	0.48	-0.18	0.02	-0.28	0.32	-0.83	0.10

Tabella 4.9: Confronto lavorazione 3 con RCI

Analizzando i dati ottenuti si può notare che non ci sono state differenze sostanziali, in alcuni punti è presente anche il segno negativo il quale indica che la lavorazione RCI ha ottenuto riduzioni di rugosità maggiori. In generale, però, si può dire che inserendo il componente con un angolo d'immersione diverso da zero si ottengono delle rugosità generali più alte. Altra caratteristica da notare è che si è ridotto il delta al tip della pala, zona in cui si erano registrate le riduzioni maggiori per la lavorazione 3, *Tab 4.6*, questo potrebbe essere dovuto al fatto che il componente risulta ad un'altezza differente quando il braccio è inclinato ed è a profondità minori. Queste considerazioni confermano in parte una delle ipotesi effettuate in precedenza, ovvero che se la superficie rimane ferma a lavorare contro il media ottiene una riduzione maggiore di rugosità, inoltre, con il pezzo che è soggetto ad una rotazione continua, sembrerebbe che il media avesse meno effetto abrasivo perché è come se la pala ruotando allontanasse il flusso e quindi la superficie risultasse meno esposta.

4.2.1 Risultati ottenuti

All'interno di questa sezione verranno discussi i risultati più significativi che sono stati ottenuti per il processo con questa tipologia di geometria e prototipi di attrezzatura. Com'è già stato analizzato in precedenza, si è notato che inserendo le superfici rivolte perpendicolarmente rispetto alla direzione del media si ottengono delle riduzioni di rugosità maggiori in tempi minori di lavorazione, per cui le prossime lavorazioni che verranno descritte sono state eseguite partendo da questa osservazione.

Dorso e ventre statico

Questo programma di lavorazione è stato impostato per andare a posizionare prima il lato dorso e successivamente il lato ventre in modo perpendicolare rispetto alla direzione di arrivo del media. Con il termine statico si intende proprio che una volta posizionata la superficie in corrispondenza dell'angolo di orientamento impostato, questa rimanga ferma a lavorare per il tempo impostato per poi ruotare e lavorare nella seconda posizione. Per la geometria utilizzata come caso studio, la richiesta dopo il processo di finitura era quella di ottenere dei valori di rugosità più bassi sul lato dorso rispetto al lato ventre. Per questo motivo si è impostato un programma che andasse a lavorare per $2/3$ del tempo sul lato dorso e per la restante parte del tempo si andasse a lavorare il ventre. I risultati ottenuti sono stati riportati in *Tab.4.10*, dove si può osservare che i delta maggiori sono sempre verso il tip della pala. I due lati sono risultati abbastanza uniformi se si trascurano i punti in prossimità della radice, quest'ultime risultano un po' in ombra e quindi meno lavorate. Dato che il dorso è rimasto maggiormente esposto al flusso del media risulta quello che ha ottenuto dei valori finali più bassi, inoltre, come ci si poteva aspettare, le riduzioni maggiori di rugosità si sono verificate nei punti nei quali si avevano valori di rugosità iniziali maggiori. Un'altra osservazione che si può fare è che mantenendo il componente fermo possono nascere delle zone d'ombra, nelle quali non si riesce a lavorare. Per questo esempio una zona d'ombra è quella del Leading Edge sul lato ventre, bisogna però considerare che questa risulta anche una zona nella quale è complicato effettuare le misurazioni a causa della geometria concava, per cui i dati raccolti potrebbero essere affetti dall'errore di un non corretto posizionamento dello strumento.

	Dorso						Ventre					
	LE			TE			LE			TE		
Punti sulla superficie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rugosità Pre Process	5.10	4.0	5.10	4.85	4.85	4.90	5.65	5.15	5.35	5.25	5.60	6.55
Rugosità Post Process	1.75	2.05	3.80	1.90	1.60	2.55	4.10	3.50	3.85	3.75	2.95	3.90
Delta totale	3.35	1.95	1.30	2.95	3.25	2.35	1.55	1.65	1.50	1.50	2.65	2.65

Tabella 4.10: Misure di rugosità della lavorazione dorso e ventre statico

Dorso e ventre dinamico

La seconda lavorazione significativa è molto simile alla precedente, la differenza risiede nel fatto che una volta posizionata la superficie perpendicolarmente rispetto al flusso, viene fatta ruotare in un range di $\pm 20^\circ$, sia per il lato dorso che per il lato ventre. In questo modo tutto il lato della pala riesce a subire l'erosione del media, questo programma è stato definito dinamico poiché la superficie del componente è sempre in movimento rispetto al flusso che arriverà sempre dalla stessa direzione. Il programma è stato realizzato mantenendo la stessa ripartizione di tempo descritta in precedenza, quindi andando a lavorare maggiormente il lato dorso.

Andando a fare una valutazione dei dati misurati, si ottengono considerazioni analoghe alla lavorazione precedente, ottenendo però delle riduzioni di rugosità maggiori in generale, quindi il tip è la zona che lavora maggiormente e verso la parte superiore si forma una zona d'ombra dovuta alla mascheratura. Il movimento del componente in un range limitato durante la lavorazione aiuta sicuramente ad abradere maggiormente le creste andando ad uniformare maggiormente le zone che ricevono bene la pressione del flusso, per far notare questa differenza rispetto alla lavorazione precedente è stato riportato il confronto tra le due lavorazioni in *Tab.4.12*. La differenza con il segno negativo evidenzia che le variazioni maggiori sono state ottenute nel caso dinamico, inoltre nel caso dinamico si sono ottenuti dei delta molto più uniformi rispetto al caso statico.

Questi primi programmi realizzati hanno permesso di avere un'idea di come agiscono i vari parametri di progetto sui componenti che vengono posizionati all'interno della cesta di lavorazione, grazie a queste informazioni l'azienda è riuscita a sviluppare il programma per poter lavorare al meglio il provino che è stato testato.

	Dorso						Ventre					
	LE			TE			LE			TE		
Punti sulla superficie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rugosità Pre Process	5.10	5.10	6.10	6.15	6.10	5.95	5.65	6.40	5.95	5.45	5.25	5.10
Rugosità Post Process	1.65	1.50	3.60	1.55	1.50	3.75	3.35	4.60	4.35	3.45	3.00	3.30
Delta totale	3.45	3.60	2.50	4.60	4.60	2.20	2.30	1.80	1.60	2.00	2.25	1.80

Tabella 4.11: Misure di rugosità della lavorazione dorso e ventre dinamico

	Dorso						Ventre					
	LE			TE			LE			TE		
Punti sulla superficie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Delta L. Statica	3.35	1.95	1.30	2.95	3.25	2.35	1.55	1.65	1.50	1.50	2.65	2.65
Delta L. Dinamica	3.45	3.60	2.50	4.60	4.60	2.20	2.30	1.80	1.60	2.00	2.25	1.80
Differenza	-0.10	-1.65	-1.20	-1.65	-1.35	-2.25	-0.75	-0.15	-0.10	-0.50	0.40	0.85

Tabella 4.12: Confronto lavorazioni

4.2.2 Analisi erosione maschere di supporto

La mascheratura delle pale è una componente importante che richiede un suo studio progettuale approfondito, infatti, la sua geometria ed i materiali che verranno utilizzati sono dei parametri che dovranno sempre essere ottimizzati fino a raggiungere una situazione semplice e conveniente per la sua realizzazione.

In generale, lo studio su questo componente viene effettuato allo scopo di fissare l'oggetto da lavorare alla macchina e di proteggere le superfici che non necessitano della lavorazione di finitura. Dev'essere un oggetto leggero, resistente alla corrosione del media e resistere ai carichi dinamici a cui è soggetta la palettatura durante la fase di lavorazione. Nel caso studio, si è sviluppata una maschera formata da due componenti: una parte superiore agganciata all'holder della macchina, dove è presente la sede per la radice della pala, e un tappo inferiore che ha il compito di proteggere una determinata zona della pala.

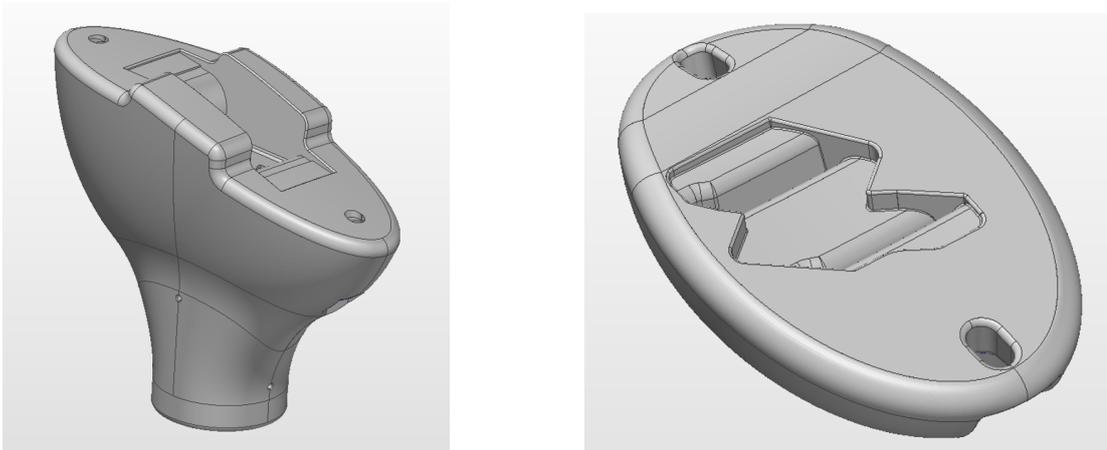


Figura 4.5: Maschera superiore e tappo inferiore

In *Fig.4.5*, sono riportate le progettazioni dell'intera attrezzatura utilizzata nelle prove sperimentali, questa è stata realizzata in additive manufacturing mediante una stampante 3D. Durante le fasi di lavorazione, le mascherature sono state a diretto contatto con il media abrasivo e di conseguenza sono state soggette a erosione dopo alcuni cicli di lavorazione. Uno studio importante sarà quello di capire quanti cicli riuscirà ad eseguire la maschera senza giungere a rottura, in modo da poter stimare il numero di lavorazioni che riuscirà ad effettuare prima di essere sostituita senza compromettere la lavorazione dei componenti.

Sono state analizzate e scansionate le maschere a diversi intervalli temporali in modo da poter monitorare come evolve l'erosione del componente, considerando che si sono svolti molti programmi prova e non si è utilizzato un solo tipo di lavorazione. Questo comporta che, in un futuro processo produttivo dove si utilizzerà un programma congelato, l'erosione della maschera potrebbe risultare differente, ma prima di arrivare ad ottenere delle mascherature ottimali bisognerà effettuare ulteriori test ed acquisire un'esperienza maggiore. Sono state eseguite delle scansioni sulla mascheratura, la prima dopo 4 ore di lavorazione, la seconda dopo 8 ore di lavorazione e la terza dopo 15 ore. Per visionare meglio l'evoluzione del danno, si è scelto di riportare la vista dall'alto del tappo, in modo da analizzare la parte più erosa e le due asole presenti sul tappo che risultano le parti più delicate per la tenuta della maschera.

Dalle immagini riportate in *Fig.4.6* e *Fig.4.7*, si nota come il componente è andato a consumarsi in modo graduale sul lato in alto a destra, si osserva proprio un incremento progressivo di una cavità già presente dopo quattro ore di lavoro. Le pareti del componente sono spesse 4 millimetri, in futuro, in quella zona, si potrà prevedere uno spessore aggiuntivo. Questa comunque non è stata la parte che ha ceduto, infatti, la maschera ha terminato la sua vita operativa a causa della

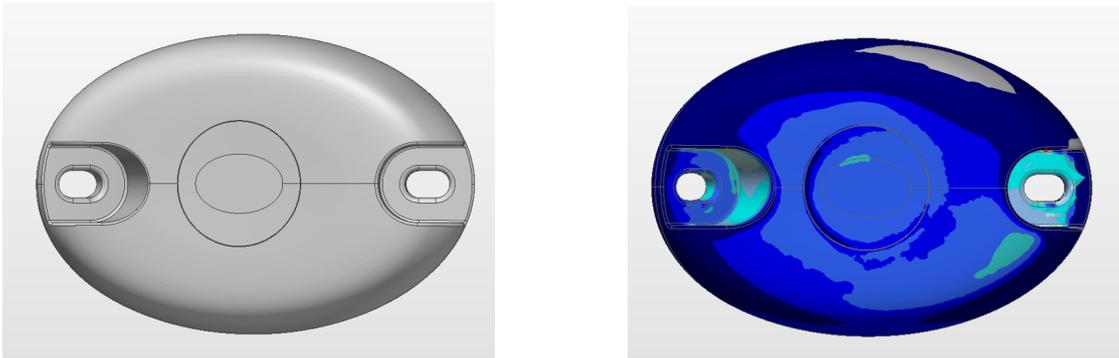


Figura 4.6: Tappo nuovo; Tappo dopo 4 ore di lavorazione

rottura del foro di destra. Questa rottura ha reso inutilizzabile il tappo per altre lavorazioni poiché non garantiva più la tenuta mediante una chiusura con barra filettata e dadi. Il tappo in questione è collocato all'interno della macchina nel punto più critico, in quanto, in profondità, sarà soggetto a sfregamenti e carichi maggiori rispetto a superfici collocate più in alto.

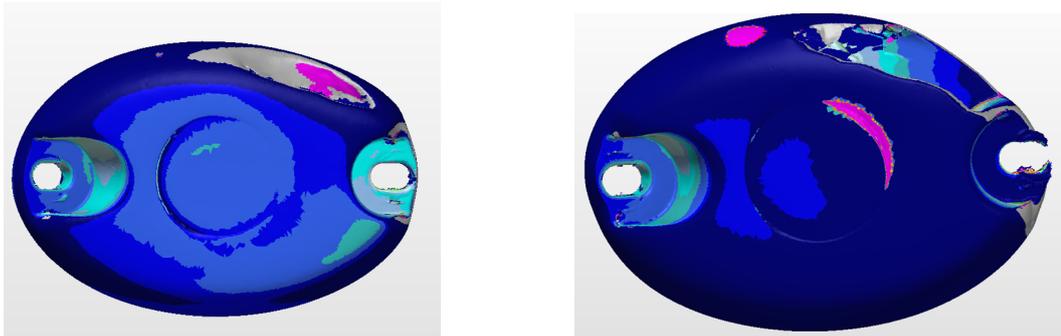


Figura 4.7: Tappo dopo 8 ore di lavorazione; Tappo dopo 15 ore di lavorazione

In generale, si può dire che utilizzare la maschera per 15 ore di lavoro può essere un buon risultato poiché questi componenti lavoreranno in macchina per tempi dell'ordine di pochi minuti. Di conseguenza, in questo arco temporale si andranno a lavorare un gran numero di componenti che compenseranno il costo dello stampaggio del componente. Sarà previsto comunque in futuro uno studio e sviluppo per ottimizzare il componente quando si andrà ad operare in un processo produttivo.

Per quanto riguarda la maschera superiore attaccata all'holder, questa non ha subito una grossa erosione, poiché questo componente è colpito in modo marginale dal media. Per questo componente, dopo 25 ore di lavoro, non si ha ancora nessuna registrazione di rotture o cedimenti che hanno portato alla sostituzione del pezzo,

ha subito solamente delle levigazioni sulle parti a contatto con la pala ma niente che ne compromettesse il montaggio.

4.3 Conclusioni utili per studi futuri

Le prove analizzate in questo capitolo sono state utili per iniziare a prendere confidenza con l'impianto, provare i vari parametri ed analizzare come questi influenzino la lavorazione nelle varie zone del profilo. È stato interessante vedere il modo in cui il flusso del media interagisce con il componente da rifinire, per poter in futuro programmare dei nuovi cicli di lavoro per componenti con differenti profili e dimensioni. Un parametro molto influente è la velocità di rotazione della cesta, in quanto maggiore sarà il suo valore e maggiore saranno gli effetti abrasivi, questo però è stato tenuto circa costante durante il processo perché non è stato necessario portare ad alti numeri di giri l'impianto, i suoi effetti sono stati osservati su altri processi che sono stati svolti all'interno dell'azienda ma non sono stati riportati all'interno di questo documento. Una considerazione sicuramente positiva è che il media utilizzato agisce esclusivamente in modo superficiale, senza andare a erodere la superficie del componente immerso, è un risultato che fa ben sperare in quanto il macchinario verrà utilizzato anche per lavorare palettature rivestite con strati di TBC che non dovranno essere rimossi.

In generale si possono osservare due considerazioni significative:

1. La parte del componente che subisce una lavorazione maggiore è quella collocata più in profondità rispetto alla cesta, questo lo si è analizzato sia con gli strumenti misurando la rugosità sui componenti, sia con l'erosione della mascheratura.
2. La posizione in cui si orienta il componente dentro la macchina è un parametro fondamentale, poiché si è osservato come la superficie che lavora maggiormente è quella esposta perpendicolarmente rispetto alla direzione del media. Questa considerazione è stata riscontrata per componenti di piccole dimensioni, andrà analizzata e verificata quando si andranno a trattare palettature di stadi maggiori con le dimensioni che saranno costantemente crescenti.

Capitolo 5

Passaggio produttivo

In quest'ultimo capitolo si andrà a spiegare lo studio svolto su palettature differenti da quelle utilizzate nei primi test, andando ad analizzare in che modo sono state pensate le maschere di supporto per poter lavorare questi componenti, ed i risultati di rugosità che sono stati raggiunti dopo il trattamento di stream finishing. Si è fatto tesoro dell'esperienza maturata in precedenza per realizzare dei nuovi programmi su componenti attualmente rifiniti a mano all'interno della ditta, questo permetterà di poter svolgere il processo di finitura in modo rapido, efficiente e ripetibile nel tempo. Oltre ad operare con componenti di geometrie e pesi maggiori, che in alcuni casi è già una criticità viste le limitate dimensioni della cesta, alcuni di questi saranno rivestiti con la barriera termica TBC. Sono le prime lavorazioni che vengono svolte su questo tipo di rivestimento, l'obiettivo sarà quello di ottenere il livello di rugosità richiesto dal cliente senza andare a danneggiare lo strato di top coat in tempi minori rispetto alle lavorazioni tradizionali.

5.1 Studio delle nuove attrezzature

Al fine di poter lavorare il maggior numero di componenti possibili tra quelli che vengono regolarmente trattati in altre lavorazioni, è stato necessario svolgere un'analisi sull'attrezzatura che servirà per proteggere le zone del componente da non lavorare e poterlo agganciare in modo rapido al macchinario. Si è andato quindi ad analizzare il tipo di geometria da lavorare, valutando opportunamente le altezze massime e gli ingombri effettivi del componente, ed è stato pensato un primo prototipo che aveva l'obiettivo di semplificare il montaggio della pala, riducendo al minimo il numero di collegamenti filettati che occorre per la chiusura della maschera, in modo che l'operatore possa effettuare il montaggio e lo smontaggio del pezzo in tempi brevi. Queste nuove geometrie non necessitano di una doppia maschera, poiché la foglia dev'essere lavorata per intero, quindi, occorrerà proteggere solamente

la radice del profilo lasciando che lavori dalla piattaforma al tip. Seguendo questo ragionamento è stato ideato un primo prototipo riportato in *Fig.5.1*

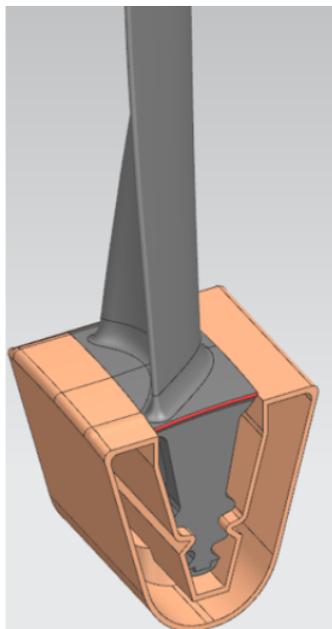


Figura 5.1: Prototipo nuove mascherature

Una volta studiato in che modo andare a mascherare questi componenti si è passati alla realizzazione però, rispetto al primo prototipo, questo nuovo attrezzo è formato da più moduli montati insieme tra loro. Infatti, si è deciso di far realizzare una cesta metallica sulla quale verrà montato l'holder per l'aggancio in macchina, in cui all'interno sarà presente un componente additivo realizzato mediante la stampa 3D che servirà per alloggiare la radice del componente e tenerla vincolata. Il tutto sarà successivamente chiuso da un coperchio anche lui realizzato di materiale polimerico e fissato alla maschera metallica mediante due spine.

La scelta di realizzare la maschera in più moduli e con materiali differenti è stata effettuata per due ragioni principalmente:

- La prima motivazione è legata al peso finale dell'attrezzatura, realizzando completamente la maschera in materiale metallico si sarebbero raggiunti dei pesi considerevoli e gravosi per l'operatore che dovrà utilizzare il macchinario. È stato quindi deciso di adottare una soluzione ibrida, dove la parte metallica sarà il componente fisso che non subirà l'effetto abrasivo, mentre le parti polimeriche saranno quelle soggette ad erosione e verranno sostituite in modo rapido quando saranno inutilizzabili.

- La seconda motivazione è legata al riutilizzo della cesta metallica, dato che le dimensioni e le altezze di alcune tipologie di pale sono risultate simili fra loro, si è deciso di utilizzare per più geometrie la parte non consumabile metallica e modificare solamente le sedi interne e la copertura esterna che varierà a seconda del componente trattato.

Questa che è stata appena descritta è una mascheratura che ha permesso di eseguire i primi test su componenti di turbogas rivestiti con la TBC, caratterizzati da dimensioni e pesi decisamente maggiori rispetto alle palette utilizzate in precedenza. Questo primo approccio ha permesso di inserire in macchina i componenti ed effettuare la lavorazione, ma si deve considerare che si tratta comunque di prototipi che dovranno essere ottimizzati in termini d'ingombri e di pesi. Viene riportato in *Fig.5.2* l'esempio di montaggio di una geometria che utilizza questa mascheratura, dove la cesta rosa è la componente metallica e la parte interna gialla e la copertura azzurra sono le parti polimeriche.

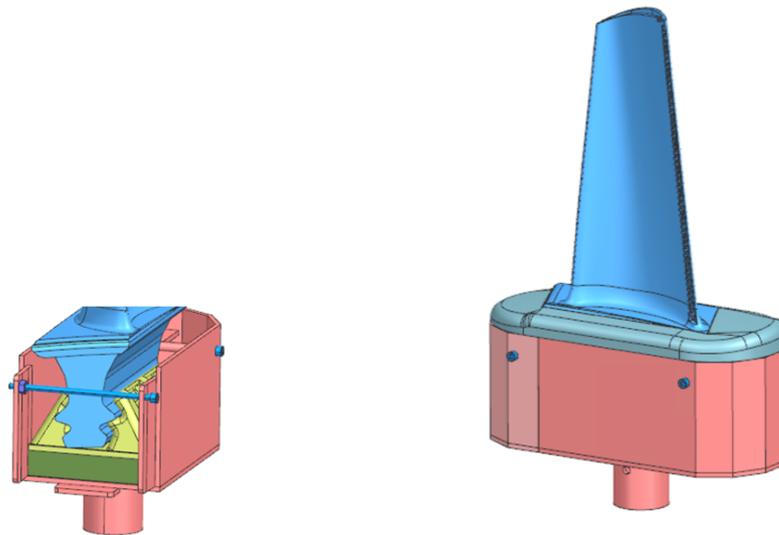


Figura 5.2: Mascheratura Pala Turbogas

5.2 Sviluppo di nuovi programmi di lavorazione per pale turbogas

Per queste nuove pale il primo approccio è stato quello di andare a valutare il loro corretto posizionamento all'interno della macchina, affinché si potessero inserire in una zona in cui la lavorazione risultasse efficace. La geometria in questione ha un'altezza della foglia di poco superiore rispetto all'altezza del media, ci sarà quindi una zona in prossimità della piattaforma che non risentirà molto degli effetti della lavorazione. Infatti, uno dei primi parametri impostati è stato quello di inserire un angolo d'immersione, in questo modo il media riesce a raggiungere tutta la foglia della pala, compresa la piattaforma, anche se in quest'ultima zona l'effetto abrasivo non sarà intenso poiché la raggiunge in modo marginale.

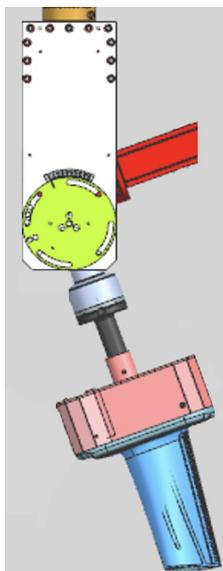


Figura 5.3: Montaggio del componente in macchina

Le prime lavorazioni sono state eseguite con una velocità della cesta modesta, di 60 rpm, ma questo ha portato subito ad alcune problematiche. La prima è stata quella di portare ad una distribuzione di rugosità sul profilo non uniforme, infatti, tenendo il provino a lavorare per 1' si sono raggiunti valori di rugosità molto bassi sul tip mentre sulla piattaforma non si è raggiunto l'obiettivo di portare la superficie sotto gli 8 Ra. Inoltre, in alcuni punti si è verificato un distacco dello strato di top coat ceramico verso il tip della pala che non sono accettabili durante le operazioni di finitura. Un altro problema che è sorto lavorando il componente a questo numero di giri è legato agli sforzi a cui è soggetta la mascheratura, infatti, essendo un componente con un'altezza elevata, si genera un forte momento sull'attacco della

radice che ha portato alla rottura del coperchio realizzato in materiale polimerico. Questo problema è stato in parte risolto andando ad abbassare il numero di giri del contenitore di lavorazione, ma questo ha portato a dover aumentare i tempi totali del ciclo. Andando a modificare i parametri di questi primi test iniziali, si è giunti a dei buoni risultati in termini di rugosità sul profilo, i principali parametri che sono stati impostati sono stati riassunti nella seguente tabella:

Tempo di lavorazione	Profondità	Angolo d'immersione	V angolare Cesta
120 sec	600 mm	15°	15 rpm

Tabella 5.1: Parametri di progetto lavorazione pala rivestita

Questa lavorazione è stata impostata con dei tempi maggiori perché impostando una velocità di rotazione della cesta inferiore si hanno degli effetti abrasivi minori. Durante questo tempo di lavorazione, il componente è stato ruotato su tre angolazioni, due relative al dorso della pala e una sul ventre, una volta portato in quelle posizioni il componente è stato tenuto fermo per 20" ed è stato ripetuto il ciclo per due volte. Questa scelta è stata fatta analizzando la configurazione della geometria, ovvero lo svergolamento della pala, con l'obiettivo di posizionare le superfici principali in modo che lavorassero con il flusso in modo perpendicolare.

Sono stati presi molti punti sul quale si è misurata la rugosità, nello specifico 9 punti sul lato dorso, 9 sul lato ventre e 3 punti sulla piattaforma. Questo è stato possibile perché la geometria ha una foglia decisamente maggiore rispetto al caso trattato in precedenza ed ha permesso di monitorare con più accuratezza tutte le zone della foglia del profilo. In *Tab. 5.2* vengono riportati i valori di rugosità che sono stati misurati in laboratorio sul dorso della pala, nella *Tab. 5.3* i valori relativi al ventre ed in *Tab. 5.4* le misurazioni effettuate sulla piattaforma. Tutti i punti sono stati misurati accuratamente prima e dopo il processo di finitura sulla superficie rivestita di TBC e vengono riportati in *Fig.5.4* i riferimenti visivi della locazione di questi punti appena descritti.

	Dorso								
	LE			Middle			TE		
Punti sulla superficie	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rugosità Pre Process	10.0	8.6	9.3	8.5	9.0	8.8	9.9	8.2	8.4
Rugosità Post Process	5.9	5.3	7.8	4.2	6	7.5	4.5	6.9	6.9
Delta totale	4.1	3.3	1.50	4.4	3	1.3	5.4	1.3	1.5

Tabella 5.2: Misure di rugosità lato dorso

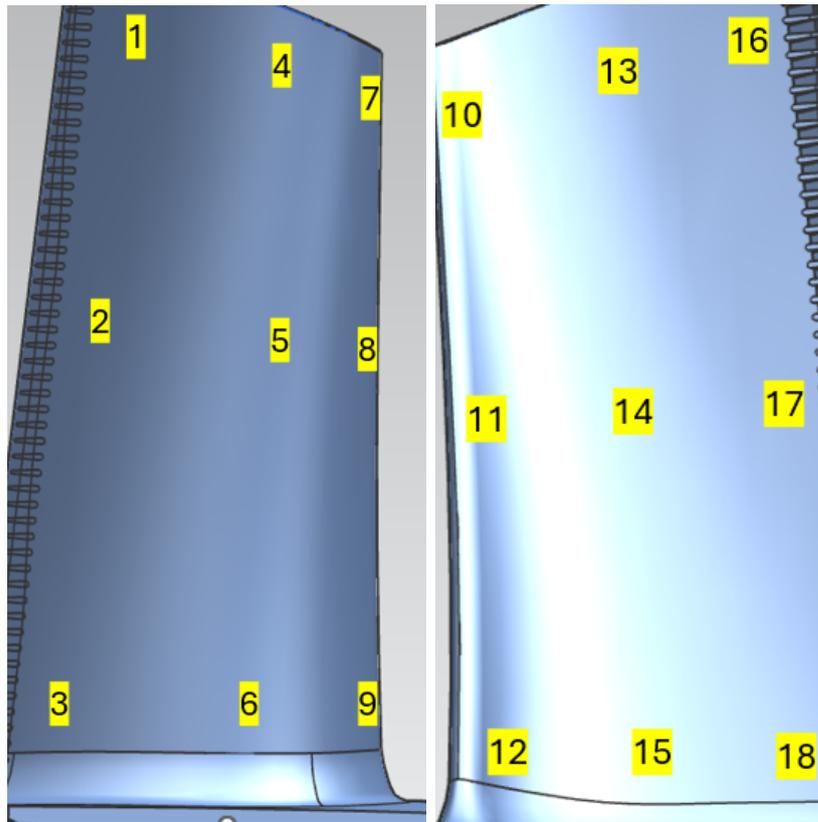


Figura 5.4: Punti misurati sul dorso e sul ventre

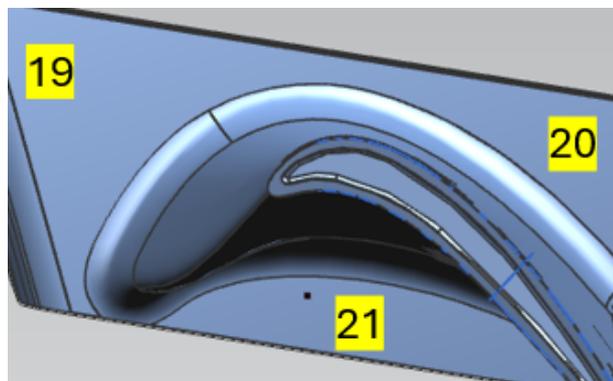


Figura 5.5: Punti misurati sulla piattaforma

L'obiettivo per poter completare in modo efficace il processo di finitura era quello di raggiungere un valore sotto agli 8 Ra su tutta la parte rivestita della palettatura. Questo risultato è stato raggiunto sulla maggior parte della superficie, soprattutto nelle zone verso il tip che risultano le più esposte e si sono registrati

	Ventre								
	LE			Middle			TE		
Punti sulla superficie	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rugosità Pre Process	8.6	8.2	9.0	8.4	8.3	8.3	10.7	9.9	9.5
Rugosità Post Process	6.2	6.6	7.5	5.8	6.9	8	4.5	6.7	9
Delta totale	2.4	1.6	1.5	2.6	1.4	0.3	6.2	2.2	0.5

Tabella 5.3: Misure di rugosità lato ventre

	Piattaforma		
Punti sulla superficie	19	20	21
Rugosità Pre Process	9.0	8.9	8.0
Rugosità Post Process	6.5	6.7	6.6
Delta totale	2.5	2.20	1.4

Tabella 5.4: Misure sulla Piattaforma

i valori di rugosità più bassi. Sono rimaste sopra questo limite solo le zone in prossimità del raccordo tra la piattaforma e la foglia della pala e la piattaforma, questi sono i punti più critici dove il media non arriva in modo diretto. Com'è già stato detto in precedenza, questo tipo di geometria ha delle dimensioni che sono al limite per la macchina, soprattutto ha la problematica aggiuntiva che è un componente con il rivestimento ceramico, questo significa che non potrà lavorare troppo tempo all'interno della macchina perché c'è il rischio che si vada a rimuovere parte di TBC. Analizzando i risultati ottenuti si vede una non uniformità della superficie, poiché si passa da valori molto bassi verso il tip della pala a valori decisamente più alti verso la radice, principalmente dovuto al collocamento nella quale è stata inserita all'interno della cesta a causa della sua elevata lunghezza, i prossimi studi saranno mirati ad uniformare i valori di rugosità sul l'intero profilo. Il processo quindi, per questa geometria, non è ancora quello ottimale, ma in ogni caso abbatte decisamente i tempi di produzione poiché in pochi minuti riesce a lavorare gran parte della foglia anche se necessita ancora di qualche ritocco di finitura manuale su alcuni punti.

In futuro, in ottica di poter sviluppare delle attrezzature ottimizzate, si potranno raggiungere dei valori di rugosità uniformi e all'interno dei limiti dei limiti richiesti, perché si potrà andare a collocare il componente più a ridosso delle pareti e quindi in una zona di lavorazione ottimale.

5.3 Analisi di fattibilità di un settore di turbina

Seguendo l'esigenza della produzione aziendale, si è voluto effettuare uno studio sulla fattibilità di poter lavorare all'interno della macchina un settore di turbina, un componente con ingombri che sono ai limiti per le dimensioni del macchinario. La sua criticità risiede sia nel peso che ha il singolo componente ma anche nella sua geometria. Inoltre, questo componente ha un'altezza della foglia che risulta maggiore rispetto all'altezza del media presente dentro la macchina. Anche se l'altezza del pezzo sembra elevata, quando il flusso abrasivo viene messo in rotazione per effetto della forza centrifuga tende a spostarsi verso i bordi del contenitore, riuscendo in parte a colmare la differenza di altezze iniziali, oltre al fatto che, quando il flusso incontra il componente il media riuscirà a raggiungere e lavorare la sommità del componente in maniera marginale poiché si crea un accumulo di grana dovuto all'interferenza dell'oggetto con il flusso. Bisogna ricordare che le zone di maggior efficienza all'interno della cesta di lavorazione sono quelle in profondità e in prossimità dei bordi del contenitore, quindi, l'obbiettivo sarà quello di andare a collocare il componente in quelle posizioni affinché possa abbattere la rugosità in maniera ottimale.

5.3.1 Mascheratura

Come al solito, il primo passo è quello di andare a sviluppare il supporto che permetterà di proteggere le parti che non necessitano di effettuare la lavorazione, oltre a permettere il montaggio del componente all'interno della macchina. Il settore in questione necessita di una doppia mascheratura per le due piattaforme, dato che il materiale finora utilizzato si è rivelato efficiente si sono realizzate le protezioni dello stesso materiale plastico già testato, invece, per permettere il montaggio in macchina è stata utilizzata una morsa e questo ha permesso di reggere il peso elevato dell'intero componente.

Per la piattaforma esterna è previsto un componente modulare realizzato in additive. È formato da tre parti dove due rimarranno sempre collegate tra loro, mentre la terza verrà tolta per permettere il montaggio del componente. Questa sarà la parte del componente che verrà totalmente immersa nel media, per cui si è pensato di realizzarla con materiale additive al fine di poterli sostituire una volta che saranno usurati. È stato pensato di montare il settore in questo modo, con la piattaforma più grande collocato nella parte inferiore della cesta, per poter garantire la lavorazione della piattaforma più grande e quindi effettuare il processo su una parte maggiore del componente.

La soluzione riportata in *Fig.5.6* è un primo prototipo che ha permesso di effettuare i primi test nel quale si è verificata la tenuta della mascheratura durante il processo di lavorazione.

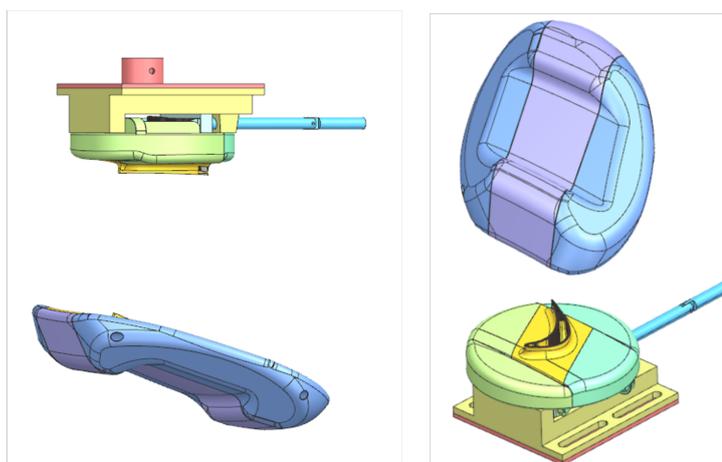


Figura 5.6: Mascheratura del settore

5.3.2 Prove in macchina

Dato l'elevato ingombro del componente da trattare, un primo studio è stato quello di verificare quanti pezzi potessero lavorare contemporaneamente dentro la macchina. Questo studio è stato realizzato dopo aver verificato che il primo prototipo della mascheratura fosse in grado di reggere i carichi statici e dinamici a cui il settore è sottoposto durante il processo, avendo quindi a disposizione le quote effettive del singolo componente più l'aggiunta della mascheratura si è effettuata una prima analisi.

All'interno della macchina sarà possibile collocare contemporaneamente fino a quattro settori, inserendoli con la piattaforma maggiore orientata verso l'interno della cesta. Andando a ruotare il pezzo di 180 gradi non sarà possibile garantire il montaggio su tutte e quattro le braccia, poiché a parità di distanza radiale, il componente andrà a urtare il contenitore di lavorazione. Oppure andando a portare il componente verso il centro del contenitore non potranno essere montati più di due settori contemporaneamente, tralasciando il fatto che sarebbero collocati in una zona non ottimale del contenitore di lavorazione. Per poter effettuare le verifiche degli ingombri, si è utilizzato il modello cad del macchinario, a cui è stato aggiunto l'assieme del prototipo della maschera più il modello del settore.

Inserendo i componenti seguendo l'orientazione mostrata in *Fig.5.7* si ha una distanza radiale ottimale per mantenere anche una distanza di sicurezza dal bordo, ed inserire comunque il pezzo in una zona di lavorazione buona per gli effetti erosivi, questa considerazione la si può verificare anche in *Fig.5.8*. Il componente non riuscirà a compiere una rotazione completa lungo il suo asse verticale a causa degli elevati ingombri, di conseguenza sarà necessario far cambiare la direzione di rotazione della cesta affinché il settore possa lavorare sia sul lato dorso che sul lato

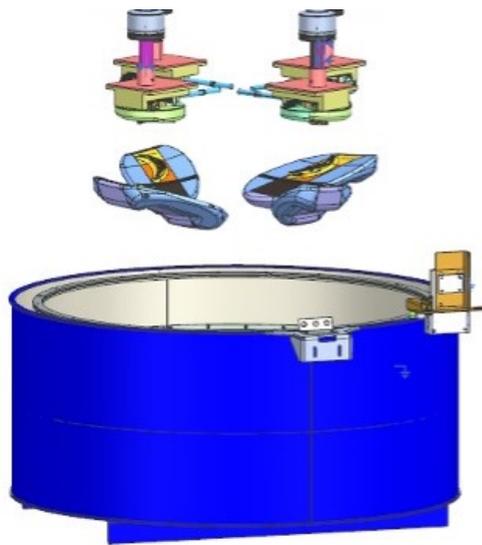


Figura 5.7: Montaggio in macchina dei settori

ventre. Com'è già stato discusso in precedenza, l'altezza del componente risulta essere maggiore dell'altezza del media quando quest'ultimo è fermo. Infatti, la piattaforma superiore sarà lavorata solo marginalmente dal media abrasivo, con il rischio che non si raggiungano i livelli di rugosità richiesti. Questo rischio sarà tanto più alto, quanti più componenti saranno lavorati contemporaneamente, perché più alto sarà il numero di componenti e più il media sarà distribuito su tutti i pezzi avendo quindi meno possibilità di raggiungere le piattaforme superiori. Questa considerazione dovrà essere verificata sperimentalmente inserendo i componenti dentro il macchinario.

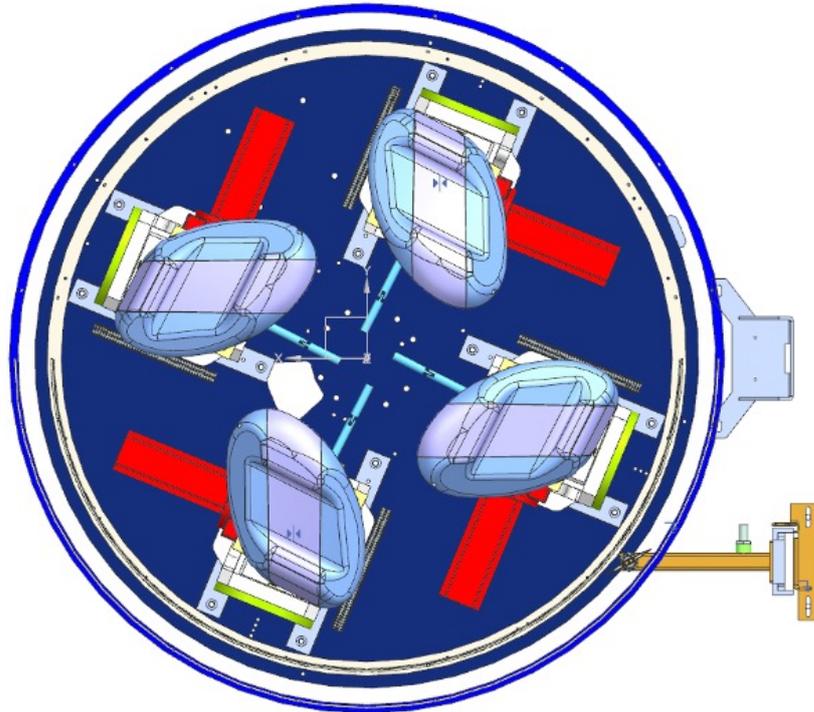


Figura 5.8: Montaggio in macchina vista dal basso

In *Fig.5.9* viene illustrato quello che è stato appena descritto, si vedono i componenti immersi alla profondità di lavorazione che garantisce 50 mm di sicurezza dal fondo del contenitore, collocati ad una distanza radiale che permette di effettuare delle rotazioni lungo l'asse verticale. Viene anche raffigurata l'altezza del media che è riportato dalla linea rossa.

Per questo componente non sono stati svolti studi sull'abbattimento della rugosità superficiale durante il periodo di tesi, verranno sviluppati successivamente dall'azienda avendo già a disposizione l'attrezzatura e l'analisi di fattibilità di lavorazione.

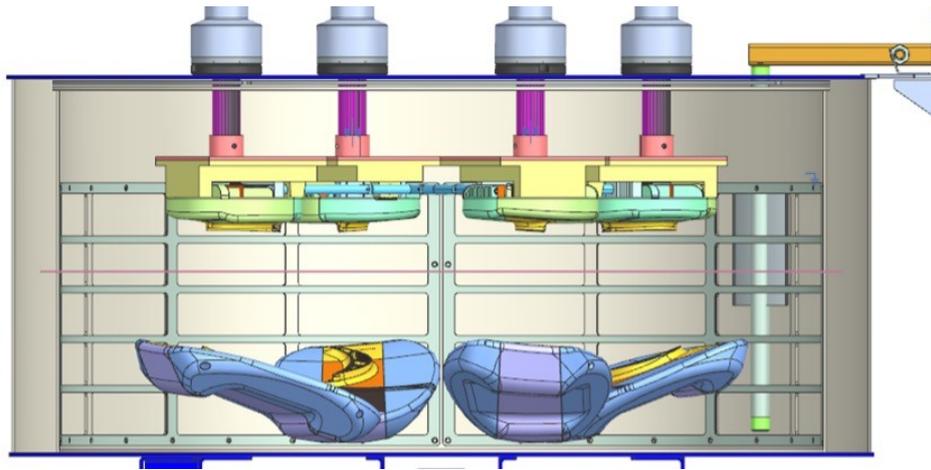


Figura 5.9: Immersione dei settori vista laterale

5.4 Guadagni di tempo e costi in percentuale

Prendendo i dati raccolti dalla produzione si sono costruiti dei grafici che rappresentano un confronto, in termini di tempi e costi, delle lavorazioni attuali per la finitura manuale contro i tempi e costi che impiegherebbe il componente se venisse qualificato il processo di Stream Finishing.

In *Fig. 5.10* si può verificare che i tempi di lavorazione di un'intera cerchiata, quindi una commessa tipica che viene svolta all'interno dell'azienda, si andrebbero a ridurre di circa il 90% quindi, ipoteticamente, si potrebbe lavorare l'intera cerchiata con un tempo pari al 10% rispetto a quello attuale. Questo perché si riuscirebbe a lavorare quattro componenti in macchina contemporaneamente, questo è sicuramente il grande vantaggio rispetto alla lavorazione di un componente alla volta.

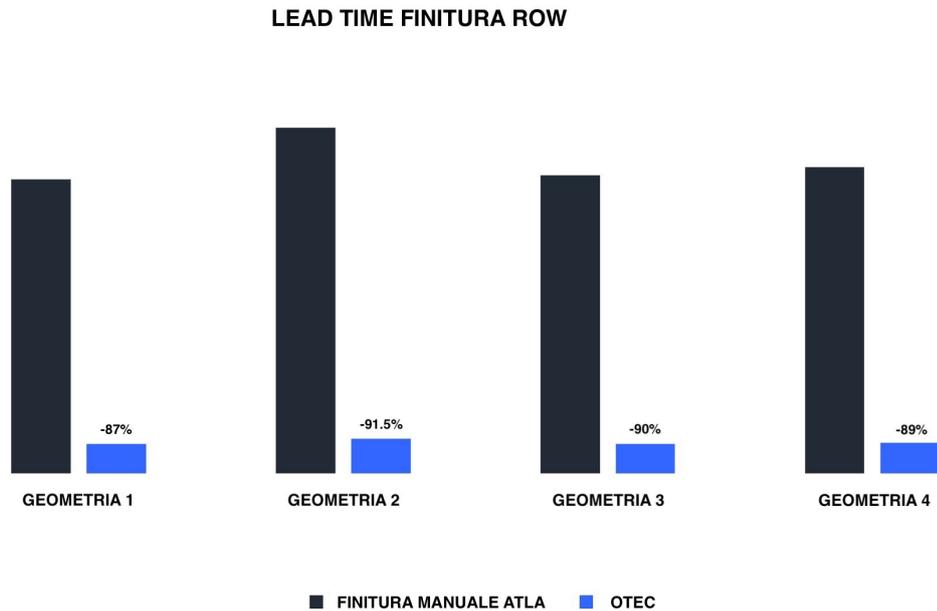


Figura 5.10: Lead Time Finitura Row

Bisogna tenere conto che al valore riportato in figura del tempo di lavorazione di SF, bisogna aggiungere il tempo di montaggio dell'attrezzatura da parte dell'operatore, questo in parte verrà effettuato mentre avviene il ciclo di lavorazione, ed il caricamento e lo smontaggio del componente all'interno della macchina. Inoltre, si sottolinea che il processo di finitura per pale di turbina di turbogas non è solamente la lucidatura del pezzo, ma sarà composto anche di ulteriori fasi per permettere al pezzo di essere completamente lavorato, ma queste non fanno parte del processo di SF, per cui non sono state valutate.

Anche l'analisi dei costi di finitura relativa ad una cerchiata fa' ben sperare, in quanto la maggior parte dei componenti verrebbero trattati internamente e non più affidati a ditte esterne, sicuramente questa condizione porterebbe già dei margini di risparmio notevoli. Questi margini di guadagno saranno raggiunti una volta che il processo sarà portato a regime, ovvero una volta la lavorazione avverrà con la macchina alla massima capienza. Da questi ricavi bisognerà considerare anche un costo relativo all'attrezzatura che occorrerà sviluppare e produrre per ogni geometria, insieme al costo degli operatori addetti che serviranno per effettuare questo processo e tutte le fasi di finitura che porteranno ad ottenere il componente pronto.

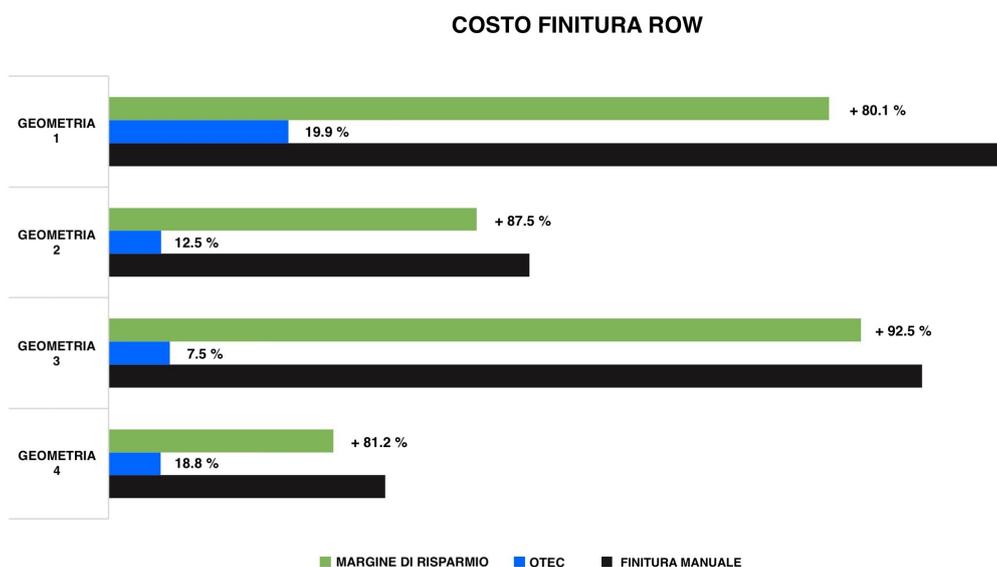


Figura 5.11: Costo Finitura Row

Capitolo 6

Conclusioni Finali

Il processo di Stream Finishing si è rivelato un metodo valido per abbattere i livelli di rugosità superficiali anche nel caso delle palette di turbina, con il principale vantaggio di ridurre notevolmente i tempi di processo rispetto alle classiche lavorazioni manuali. Com'è stato analizzato nel capitolo 5, si ottengono delle grosse riduzioni in termini di tempi ciclo, abbattendo di circa il 90% i tempi attuali di finitura, andando quindi ad ottimizzare una fase di lavorazione che essendo tra le ultime risulta abbastanza critica. Il macchinario ha un impatto basso sull'ambiente, in quanto non presenta dei consumi elevati e non ha grossi sprechi di liquidi poiché è un ciclo chiuso che permette di non sprecare risorse e permette sempre di avere separato il liquido riutilizzabile dal materiale di scarto.

Sono state eseguite molte prove pratiche all'interno dell'azienda, è stato osservato come i parametri di processo influenzano i valori finali di rugosità, il parametro più influente è sicuramente la velocità di rotazione della cesta, infatti, all'aumentare della velocità si sono notati degli effetti abrasivi maggiori. Componenti più leggeri hanno resistito meglio quando si è provato a far ruotare la cesta ad alta velocità, per quanto riguarda i componenti con dimensioni ed ingombri maggiori si è scelto di lavorarli con velocità inferiori per salvaguardare le attrezzature che venivano sollecitate in maniera eccessiva portandole a degradarsi velocemente dopo pochi cicli di lavoro.

Un altro parametro importante è l'orientamento della superficie di lavorazione rispetto al media abrasivo, si è osservato come la superficie quando è posta perpendicolarmente rispetto al flusso abrasivo subisce delle grosse riduzioni di rugosità. L'obiettivo però per questo tipo di componenti è quello di ottenere dei livelli di rugosità uniformi su tutta la superficie e sulle piattaforme, per cui la lavorazione che è risultata più adatta è quella in cui il profilo variava in un range di pochi gradi. Inserendo il componente con un angolo d'immersione diverso da zero, si è verificato che non essendo più la superficie perpendicolare al flusso otteneva delle lavorazioni minori, portando ad allungare i tempi totali del processo per

raggiungere lo stesso livello di rugosità finale. Un fattore comune che hanno avuto tutte le lavorazioni è stato quello che la parte più lavorata risultasse sempre il tip della pala, questo perché è sempre stata la zona che ha lavorato a profondità maggiori, collocandosi praticamente al fondo della cesta, evidenziando come in quella zona del contenitore sono maggiori gli effetti dei carichi centrifughi ed il peso del media abrasivo. Salvaguardare il tip della pala è risultata una criticità quando si è iniziato ad utilizzare i componenti rivestiti da TBC, poiché quella è una zona in cui l'aderenza dello strato ceramico non è ottimale e, per come sono realizzate le attrezzature, veniva posizionata in profondità per permettere al media di lavorare tutta la superficie rivestita.

È stata validata un'altra considerazione che era stata trovata in letteratura, ovvero che il processo di Stream Finishing agisce sulla superficie a livello microscopico sul pezzo che lavora se viene utilizzato per un tempo limitato, infatti si è osservato sui componenti rivestiti di TBC una riduzione minima degli spessori, cosa che invece non accadeva nel caso della finitura manuale, dove l'operatore doveva porre molta attenzione a non passare per troppo tempo il panno sul componente per evitare di rimuovere troppo materiale dal rivestimento.

È chiaro quindi che la posizione in cui inserire il pezzo a lavorare all'interno della macchina sia una delle criticità maggiori, in quanto si sono viste e osservate delle chiare zone in cui il componente lavora di più o di meno. Uno studio futuro che si dovrà sicuramente svolgere sarà sulle attrezzature dei vari componenti che dovranno subire il processo di Stream Finishing, poiché bisognerà trovare una protezione in grado di permettere al pezzo di poter lavorare nella sua integrità in una zona che sia in prossimità delle pareti della vasca per sfruttare al meglio l'effetto della forza centrifuga. Inoltre, un corretto attrezzaggio permetterebbe di non lasciare delle zone d'ombra, quindi poco lavorate, e di poter riutilizzare l'attrezzatura per molti cicli di lavoro anche se venisse realizzata con materiali plastici con tecniche additive.

Bibliografia

- [1] Philip G Hill e Carl R Peterson. «Mechanics and thermodynamics of propulsion». In: *Reading* (1992).
- [2] Jack D Mattingly. *Aircraft engine design*. Aiaa, 2002.
- [3] Jogender Singh, Farhat Quli, Douglas E Wolfe, J Thomas Schriempf e Jason Singh. «An overview: Electron beam-physical vapor deposition technology—Present and future applications». In: *Applied Research Laboratory, Pennsylvania State University, USA* (1999).
- [4] Jayant Gopal Thakare, Chandan Pandey, MM Mahapatra e Rahul S Mulik. «Thermal barrier coatings—A state of the art review». In: *Metals and Materials International* 27 (2021), pp. 1947–1968.
- [5] Abdullah Cahit Karaoglanli, Kazuhiro Ogawa, Ahmet Türk e Ismail Ozdemir. «Thermal Shock and Cycling Behavior of Thermal Barrier Coatings (TBCs) Used in Gas Turbines». In: *Progress in Gas Turbine Performance*. A cura di Ernesto Benini. Rijeka: IntechOpen, 2013. Cap. 10. DOI: 10.5772/54412. URL: <https://doi.org/10.5772/54412>.
- [6] M. Peters, C. Leyens, U. Schulz e W. A. Kaysser. «EB-PVD Thermal Barrier Coatings for Aeroengines and Gas Turbines». In: *Advanced Engineering Materials* 3.4 (2001), pp. 193–204. DOI: [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(200104\)3:4<193::AID-ADEM193>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1527-2648(200104)3:4<193::AID-ADEM193>3.0.CO;2-U). eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/1527-2648%28200104%293%3A4%3C193%3A%3AAID-ADEM193%3E3.0.CO%3B2-U>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1527-2648%28200104%293%3A4%3C193%3A%3AAID-ADEM193%3E3.0.CO%3B2-U>.
- [7] «Effect of surface roughness on the aerodynamic performance of turbine blade cascade». In: *Propulsion and Power Research* 3.2 (2014), pp. 82–89. ISSN: 2212-540X (cit. a p. 14).

- [8] Shadab Ahmad, Swati Gangwar, Prabhat Chand Yadav e D. K. Singh. «Optimization of process parameters affecting surface roughness in magnetic abrasive finishing process». In: *Materials and manufacturing processes* 32 (2017). ISSN: 1042-6914 (cit. a p. 14).
- [9] *General Electric Power*. <https://www.ge.com/gas-power>.
- [10] *Mitsubishi Power Aero*. <https://power.mhi.com/group/aero/products>.
- [11] FW Preston. «The theory and design of plate glass polishing machines». In: *J. Society of glass Tech.* 11 (1927), p. 214 (cit. a p. 19).
- [12] Richard Brocker. *Relativgeschwindigkeiten und Kontaktkräfte beim ungeführten Vibrationsgleitschleifen*. Apprimus-Verlag, 2015 (cit. a p. 19).
- [13] Fukuo Hashimoto, Stephen P Johnson e Rahul G Chaudhari. «Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process». In: *Cirp Annals* 65.1 (2016), pp. 325–328 (cit. a p. 19).
- [14] A Yabuki, MR Baghbanan e JK Spelt. «Contact forces and mechanisms in a vibratory finisher». In: *Wear* 252.7-8 (2002), pp. 635–643 (cit. a p. 19).
- [15] D Ciampini, M Papini e JK Spelt. «Impact velocity measurement of media in a vibratory finisher». In: *Journal of materials processing technology* 183.2-3 (2007), pp. 347–357 (cit. a p. 19).
- [16] Frederik Zanger, Andreas Kacaras, Patrick Neuenfeldt e Volker Schulze. «Optimization of the stream finishing process for mechanical surface treatment by numerical and experimental process analysis». In: *CIRP Annals* 68.1 (2019), pp. 373–376. ISSN: 0007-8506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.086>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850619301155> (cit. a p. 20).
- [17] Wieslaw Budzisz e Adam Marciniac. «The New Gear Finishing Method Research for Highly Loaded Gears». In: *Aerospace* 9.3 (2022). ISSN: 2226-4310. DOI: [10.3390/aerospace9030131](https://doi.org/10.3390/aerospace9030131). URL: <https://www.mdpi.com/2226-4310/9/3/131> (cit. a p. 20).
- [18] *OTEC Präzisionsfinish GmbH*. <https://www.otec.de>.
- [19] *SAMA tools Rugosimetro Digitale*. <https://www.samatools.it/Rugosimetro-Digitale-Portatile-Compatto-campo-misura-0,05-10um>.
- [20] *RUGOSIMETRO PALMARE RT10 E RT10G*. <https://www.geass.com/rugosimetro-palmare-rt10-e-rt10g/>.