

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

Misurazione mediante scansione ottica nel processo di fusione a cera persa: studio su componenti di turbina rotorici e statorici



Relatore

Prof. Giulio Romeo

Candidato

Nicola Viscido

Luglio 2018

Indice

1	Macchine motrici	1
1.1	Principio di funzionamento	1
1.2	Componenti	3
1.2.1	Presa d'aria	3
1.2.2	Compressore	4
1.2.3	Combustore	5
1.2.4	Turbina	6
1.2.5	Ugello	7
1.3	Ambiente operativo	7
1.4	Materiali	8
2	Fusione a cera persa	11
2.1	Origini del processo	11
2.1.1	Le prime fusioni	11
2.1.2	Introduzione della cera	12
2.2	Affermazione e diffusione del processo	12
2.2.1	Prime testimonianze scritte del processo	13
2.2.2	Europa e il Mediterraneo	14
2.3	Evoluzione del processo	15
2.3.1	I monasteri e le documentazioni	17
2.3.2	Dal Rinascimento all'epoca moderna	17
3	Microfusione	20
3.1	Creazione del modello in cera	21
3.1.1	Iniezione	22
3.1.2	Controlli	25
3.1.3	Preparazione e montaggio	26
3.2	Formatura	28
3.2.1	Rivestimento	28
3.2.2	Evacuazione	31

3.2.3	Cottura e controllo	32
3.3	Fonderia	32
3.3.1	Forno Roll Over	33
3.3.2	Forno a vuoto	35
3.4	Post-casting	36
3.4.1	Lavorazioni e rifiniture	37
3.4.2	Attacchi chimici e trattamenti termici	37
3.4.3	Controlli specifici e dimensionali	39
4	Strumenti di controllo dimensionale	42
4.1	Misura a coordinate	42
4.2	Scansione ottica 3D	45
5	Introduzione di uno strumento di misura	50
5.1	Scansione e poligonalizzazione	51
5.1.1	Gabbia e marcatori	52
5.1.2	Acquisizione della superficie	54
5.1.3	Creazione e modifiche della superficie	56
5.1.4	Ottimizzazione dei tempi di misura	57
5.1.5	Raccolta dati	59
5.2	Strumento di analisi	61
5.2.1	Analisi	61
5.3	Elaborazione e comparazione dei risultati	66
5.3.1	Valutazione statistica	67
5.3.2	Comparazione delle misure	72
5.4	Conclusioni	76

Simboli

Simbolo	Grandezza	Unità di misura
\dot{m}	Portata	kg/s
M	Numero di Mach	
p	Pressione	Pa
R	Costante dei gas	$J/(Kmol)$
s	Entropia	J/K
T	Temperatura	K
u	Velocità assoluta	m/s
U	Velocità del rotore	m/s
w	Velocità relativa	m/s
s	Deviazione std. campionaria	
σ	Deviazione std.	
μ	Media	

Sommario

Il presente lavoro si prefigge di introdurre una tecnologia di fusione ampiamente utilizzata nella realizzazione di componenti per macchine motrici, siano esse propulsori aeronautici o turbine a gas.

La tecnologia in questione è indicata in letteratura con diversi nomi: microfusione, fusione a cera persa o *investment casting*. La necessità, per determinati componenti, di utilizzare la microfusione piuttosto che un'altra tecnologia, deriva dalla geometria più o meno complicata con cui sono concepiti e dai materiali scelti. Si pensi a vorticatori, bruciatori e palette di turbina di cui farò un accenno più avanti.

L'intera tesi è stata pensata, ideata e sviluppata presso l'azienda Deloro Microfusione S.r.l., sita a Pieve Emanuele (MI).



Qui ho ricevuto la guida e il supporto di ingegneri, tecnici e operai, al fine di costruire un quadro chiaro e completo sui dettagli del processo. Infine ho ricevuto l'incarico di sviluppare un lavoro per ottimizzare una fase del processo, supportato e seguito dagli ingegneri del settore in questione.

Introduzione

La microfusione rientra nelle tecnologie di fonderia: la realizzazione del pezzo avviene mediante la colata di metallo fuso in una forma opportunamente progettata. Ritroviamo tale tecnica in diversi ambiti della meccanica, ma, viste le proprietà che si riescono a conferire ai getti, è impiegata specialmente in campo aeronautico e industriale [1]. La maggior parte dei pezzi realizzati sono componenti di propulsori aeronautici e macchine motrici industriali, le cui caratteristiche, sia meccaniche che geometriche, fanno della microfusione una delle tecnologie più adatte alla loro creazione.

Motori aeronautici e industriali presentano configurazioni molto simili tra di loro, sebbene abbiano requisiti e funzioni ben diverse. Si pensi semplicemente alla potenza richiesta, al peso e all'ambiente operativo. Nel processo produttivo stesso, la fusione a cera persa, presenta degli accorgimenti particolari in base alla funzione del componente stesso. La variazione o l'aggiunta di alcune fasi può migliorare le caratteristiche meccaniche, la finitura superficiale o la possibilità di rientrare in tolleranze più stringenti.

L'azienda che mi ha ospitato per elaborare questa tesi produce componenti del cosiddetto *hot path* di turbine a gas, per questo motivo passerò ad una breve descrizione di queste, piuttosto che di propulsori aeronautici.

Capitolo 1

Macchine motrici

Per macchina motrice si intende una macchina a fluido capace di estrarre energia da un flusso in moto. Un chiaro esempio di macchina motrice è la turbina. Essa è costituita da vari elementi in grado di deviare il flusso per mettere in rotazione un albero da cui viene estratta la potenza necessaria.



Figura 1.1: *9HA.01 Gas Turbine, GE*

La turbina è solo una parte dell'intero sistema che costituisce la turbina a gas, rappresentata nella Figura 1.1. Si distinguono, a partire da sinistra, la presa d'aria, concentrica con l'albero da cui si estrae la potenza prodotta, compressore assiale composto da 14 stadi, combustore, turbina a 4 stadi e ugello di scarico.

1.1 Principio di funzionamento

L'intero motore è fissato al suolo e riceve aria dalla presa posta in ingresso ed espelle i gas combusti dall'ugello. Il flusso d'aria è richiamato all'interno del compressore che è messo in rotazione dalla turbina stessa. Il compressore ha il compito di comprimere l'aria fornendo energia tramite la rotazione delle palette; l'aria compressa entra nel combustore e si miscela con il carburante opportunamente iniettato per permettere

una combustione ottimale. Il flusso energizzato e ad alta pressione entra in turbina e alimenta la rotazione dell'albero che è direttamente collegato al compressore e al generatore elettrico. Al flusso viene estratta gran parte della sua energia e fuoriesce dall'ugello e disperso nell'ambiente.

Per massimizzare l'efficienza, in una centrale elettrica, la turbina a gas (1) è affiancata da una turbina a vapore (2), capace di fornire ulteriore potenza allo stesso generatore (3). I gas combusti prodotti dalla turbina contengono energia sufficiente per essere sfruttata. Una centrale elettrica combinata può presentarsi in diverse configurazioni, ma la più efficiente prevede che i gas combusti vengano convogliati in uno scambiatore di calore (4) per riscaldare l'acqua, i cui vapori alimentino la turbina (2).



Figura 1.2: *Struttura di una centrale elettrica con ciclo combinato*

Il fluido (aria) interessato dall'elaborazione nella turbina a gas segue una serie di trasformazioni, due adiabatiche e due isobare, secondo il Ciclo di Brayton-Joule, mentre, per la turbina a vapore, il fluido (acqua), percorre un ciclo termodinamico denominato Rankine, caratterizzato da un cambiamento di stato. La combinazione dei due è rappresentabile, sul piano T-s, come in Figura 1.3

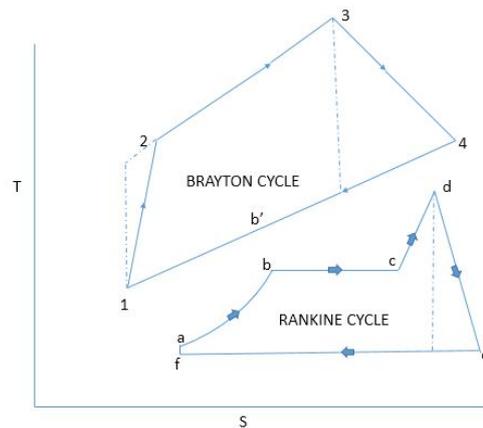


Figura 1.3: *Rappresentazione dei cicli Brayton-Joule e Rankine*

1.2 Componenti

In una turbina a gas si possono distinguere diversi elementi principali, ognuno con una funzione specifica, da cui dipendono geometrie, dimensioni e materiali. In ordine di avanzamento del flusso troviamo: presa d'aria (1), compressore (2), camera di combustione (3), turbina (4) e ugello (5).

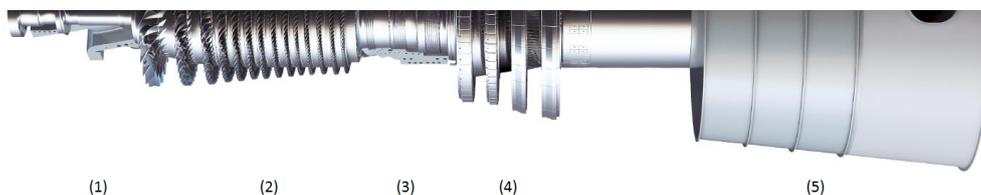


Figura 1.4: *Dettaglio della turbina a gas 9HA.01, GE*

1.2.1 Presa d'aria

Il primo componente con cui il flusso entra in contatto è la presa d'aria. La sua funzione principale è quella di catturare una certa portata d'aria dall'esterno e convogliarla nel motore nelle condizioni migliori per il funzionamento ottimale del compressore. Il flusso dev'essere più omogeneo possibile e a un determinato numero di Mach. Le dimensioni di ingresso presa e ingresso compressore determinano la velocità, in base alle condizioni ambientali, così come si evince dalla formula della portata (1.1).

$$\dot{m} = \frac{Ap^0}{\sqrt{RT^0}} f(M) \quad (1.1)$$

Si ricava dalla classica formula della portata che prende in considerazione densità, velocità e area, ma viene riportata in funzione di parametri fluidodinamici rilevanti per il funzionamento della macchina. Al numeratore troviamo la pressione totale, che nel caso di turbina a gas corrisponde alla pressione ambiente, essendo l'aria catturata inizialmente ferma, e una funzione del numero di Mach, mentre, al denominatore, si ha la temperatura sotto radice quadrata. Nella presa d'aria, da ingresso a uscita, le grandezze totali restano costanti, a meno di perdite legate a scambi termici ed effetti viscosi. Per ottenere la portata voluta si fissano geometria e numero di Mach di ingresso compressore.

1.2.2 Compressore

Il compressore è un organo rotante composto da una successione alternata di palette rotoriche e statoriche. Le palette rotoriche sono fissate su dischi solidali all'albero e hanno la funzione di trasferire energia al fluido mediante la rotazione. L'andamento del flusso tra i vari stadi è fortemente tridimensionale, ma si può pensare ad un progetto bidimensionale ragionando a raggio costante. Un esempio può essere quello a raggio medio, da cui si ottiene una schiera bidimensionale di profili alari, ricavati dall'intersezione di un cilindro coassiale con l'albero come in figura 1.5

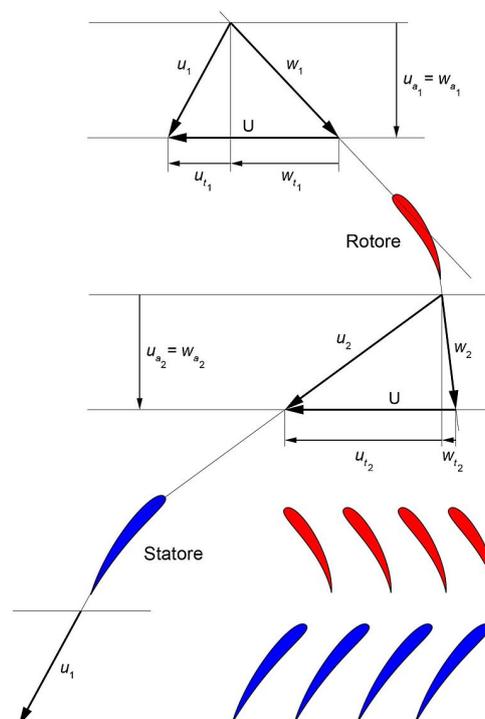


Figura 1.5: *Rappresentazione di una schiera di un compressore assiale*

Calettamento e curvatura delle pale sono progettate in funzione della direzione in ingresso del flusso e del grado di compressione che gli si vuole conferire. Le problematiche principali derivano dal fatto che, poiché la velocità relativa varia in funzione del raggio, sia in direzione che in modulo, è necessario uno svergolamento lungo l'apertura della pala. La necessità di avere più stadi, nell'ordine della decina, è conseguenza del fatto che il flusso procede all'interno del motore in condizioni di gradiente di pressione avverso. Se si volesse ottenere un elevato incremento di pressione con un singolo stadio, il flusso staccerebbe facilmente dalla linea del profilo, conducendo allo stallo. Lo svergolamento diventa perciò una proprietà geometrica necessaria per la progettazione delle pale, sia rotoriche che statoriche.

Le pale statoriche possono essere presenti in gruppi da più "foglie" e vengono fissate alle pareti che racchiudono il compressore. Dal punto di vista fluidodinamico le loro funzioni sono: raddrizzare il flusso per dargli la direzione opportuna per l'ingresso nello stadio successivo e recuperare parte della pressione, rallentando il flusso appena accelerato dalle pale rotoriche.

1.2.3 Combustore

Lo stadio immediatamente successivo al compressore è il combustore: è un insieme di componenti e può presentarsi in configurazioni differenti. Le turbine a gas presentano comunemente una distribuzione radiale di singole camere di combustione in comunicazione l'una con l'altra.

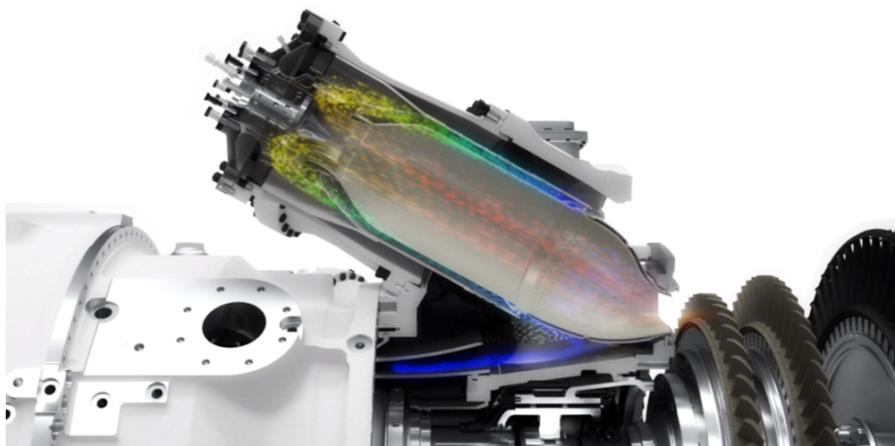


Figura 1.6: Sezione di una camera di combustione con rappresentazione cromatica del flusso

Tale configurazione è denominata a flusso invertito, poiché, come illustrato in figura 1.6, il fluido ad alta pressione entra in camera procedendo nel verso opposto

fino agli iniettori, dove il combustibile, opportunamente vaporizzato, reagisce con l'ossigeno del flusso d'aria, per poi proseguire nel verso principale. Tale principio di funzionamento consente di ottenere una camera di lunghezza inferiore rispetto alla combustione a flusso diretto, in più sfrutta il flusso in ingresso camera per raffreddare le pareti del canale dei gas combusti.

1.2.4 Turbina

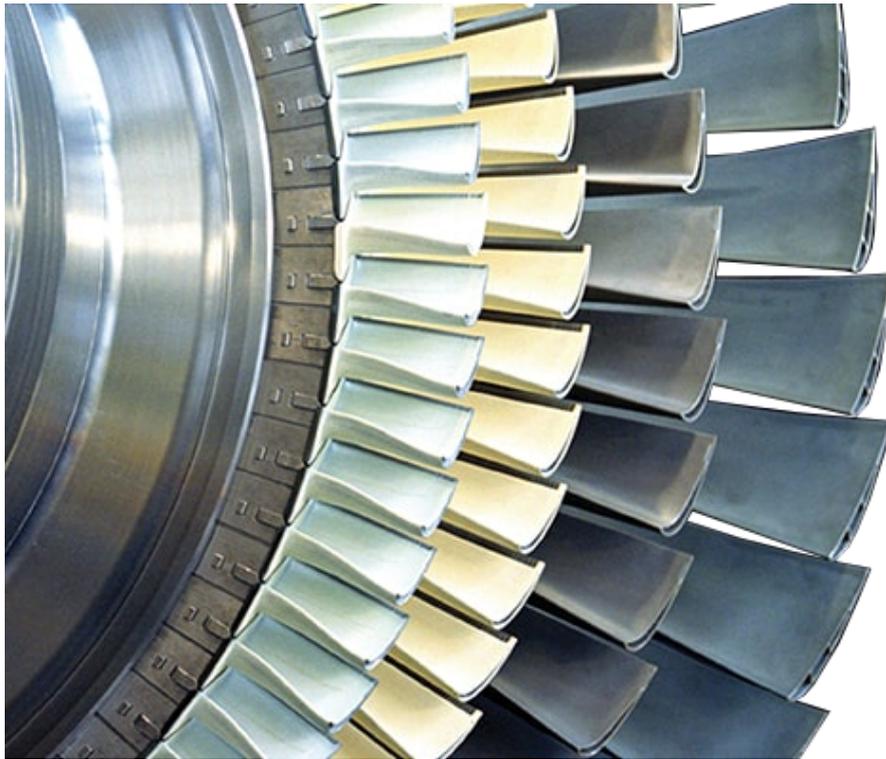


Figura 1.7: Schiera di pale di turbina montate sui rispettivi dischi di turbina

I gas caldi e ad alta energia prodotti in camera di combustione entrano subito in contatto con il primo stadio di turbina, in cui il fluido espande cedendo gran parte della propria energia. La struttura della turbina è equivalente al compressore, ma il rotore, in questo caso, è messo in rotazione dal fluido così da alimentare l'intero sistema (compressore e generatore elettrico). Le geometrie sono diverse dal compressore, in particolare le palette presentano profili con curvatura più spinta, grazie al fatto che lavorano in condizioni di gradiente di pressione favorevole, che allontana il flusso dalla condizione di stallo. Questa condizione permette di recuperare la pressione attraverso un numero di stadi esiguo.

1.2.5 Ugello



Figura 1.8: *Diffusore per i gas esausti di una turbina a gas*

I gas elaborati dalla turbina perdono gran parte della loro energia, mentre quella restante andrebbe dispersa nell'ambiente. L'ugello ha il compito di espellere in modo opportuno i gas combusti, sia che essi debbano essere dispersi nell'aria, sia che siano riutilizzati per un altro ciclo. Il flusso proveniente dalla turbina ha un moto fortemente tridimensionale, quindi si cerca di renderlo assiale quanto più possibile per facilitare la fase di espulsione o riutilizzo.

1.3 Ambiente operativo

I componenti di una turbina a gas lavorano in condizioni di stress termici e meccanici elevati, sebbene le condizioni critiche si limitino in una zona circoscritta: vicino al combustore. Da una parte troviamo gli ultimi stadi del compressore, dove le palette lavorano su un flusso a pressione e temperatura elevate; dall'altra c'è la turbina che elabora i gas caldi provenienti dalla camera di combustione. La temperatura pone dei limiti sull'utilizzo della macchina: non va superato il punto di fusione del metallo, che, seppur alto, è minore della temperatura massima raggiungibile dalla fiamma di combustione; le proprietà meccaniche decrescono con l'aumentare della temperatura; può insorgere, inoltre, il fenomeno del *creep* per cui un metallo che lavora ad alta temperatura si deforma plasticamente sottoposto a sforzo costante.

Gli organi di una turbina a gas sono sottoposti ad una moltitudine di sforzi, sia statici che dinamici. Le pale rotoriche e statoriche, sia in turbina che nel compressore, sono attraversate dal fluido che scambia con esse forze di tipo aerodinamiche, ma lo sforzo maggiore è relativo alle forze centrifughe a cui sono sottoposte le pale rotoriche, essendo in rotazione ad alto numero di giri e poste ad un certo raggio rispetto all'albero.

Si evince che i componenti debbano essere progettati in modo da resistere per un certo numero di cicli alle condizioni di lavoro della macchina. Tra i vari accorgimenti adoperati per allungare la vita operativa dei particolari più critici, si sfrutta parte del fluido proveniente dal compressore per refrigerare le palette in turbina attraverso canaline appositamente create all'interno dei profili. Proprio la fusione a cera persa viene incontro a tali esigenze, essendo un processo che gode di un'ottima flessibilità nella realizzazione di geometrie interne per il raffreddamento. Il processo di microfusione, inoltre, permette di realizzare pezzi in materiali che si prestano male a lavorazioni meccaniche o stampaggio.

1.4 Materiali

Lo sviluppo principale dei componenti di turbine a gas è proprio sui materiali utilizzati: materiali più resistenti ad alte temperature hanno permesso, negli ultimi decenni, di aumentare di centinaia di gradi la temperatura operativa delle turbine, incrementando, in questo modo, di qualche punto percentuale l'efficienza complessiva della macchina.

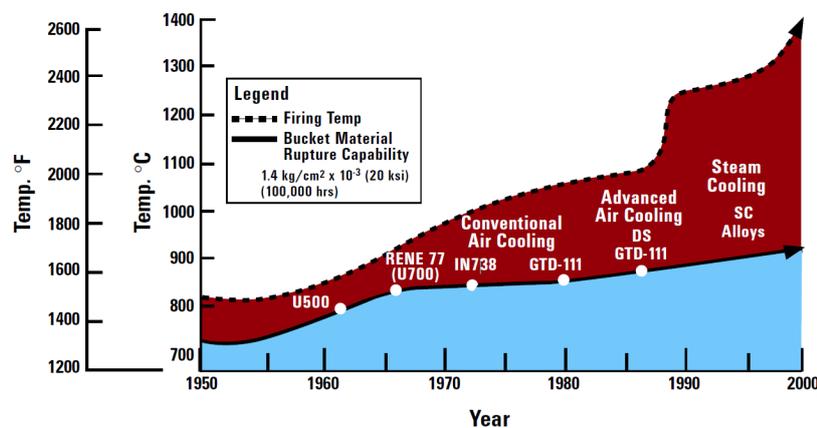


Figura 1.9: Andamento della temperatura massima raggiunta in turbina nell'arco di 50 anni

La figura 1.9 mostra di quanto sia aumentata la temperatura di esercizio (*firing temperature*) delle macchine motrici dal 1950 al 2000. Tale incremento è dovuto all'impiego di materiali e tecniche sempre più performanti per la realizzazione dei componenti critici dal punto di vista termico, che registrano resistenze meccaniche sempre maggiori ad alte temperature. Il contributo maggiore, come mostrato dal salto di temperatura registrato alla fine degli anni '80, è da attribuire allo sviluppo di sofisticati sistemi di raffreddamento dei componenti [9].

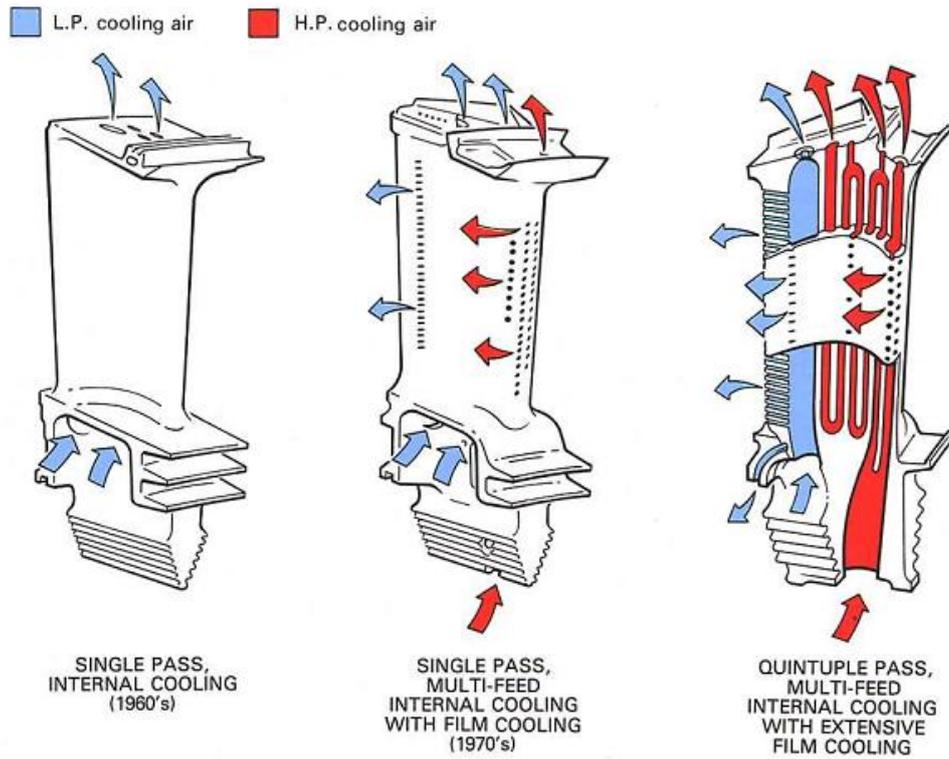


Figura 1.10: Implementazione di sistemi di raffreddamento avanzati

Tra i materiali utilizzati troviamo specialmente superleghe metalliche a base nichel o cobalto e l'impiego di strutture cristalline direzionali o ad unico cristallo. Tra gli altri parametri da tenere in considerazione per la scelta del materiale c'è da includere anche una buona resistenza all'impatto, a corrosione e ossidazione ad elevate temperature [10].

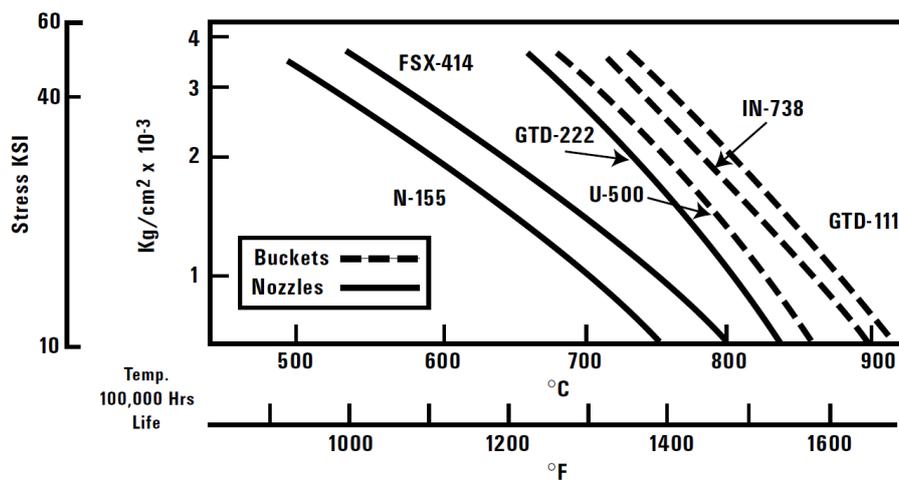


Figura 1.11: Andamento della resistenza in funzione della temperatura dei principali materiali utilizzati

La figura 1.11, oltre ad indicare le sigle dei principali materiali utilizzati per palette rotoriche (*Buckets*) e statoriche (*Nozzles*), mostra l'andamento della tensione di rottura a fatica per 100000 ore di funzionamento all'aumentare della temperatura di esercizio.

La necessità di ottenere pezzi più resistenti, affidabili e che preservino le loro caratteristiche per il maggior tempo possibile, ha portato all'introduzione di tecnologie sempre più avanzate, sia nella scelta dei materiali, che nei processi di produzione. La fusione a cera persa si presta bene sia all'utilizzo delle superleghe sopraccitate, che alla realizzazione di geometrie adatte ai sistemi di raffreddamento avanzati attualmente utilizzati.

Capitolo 2

Fusione a cera persa

La microfusione è un processo basato sulla tecnica di fusione a cera persa ed è costituita da un susseguirsi di fasi altamente specializzate volte ad ottenere le proprietà geometriche e metallurgiche richieste. La fusione a cera persa, come si evince dal nome, è una tecnologia che prevede l'impiego di un materiale, in questo caso la cera, per la realizzazione del modello. Attorno alla cera viene creato lo stampo in materiale refrattario (da qui il termine *investment*: investimento, rivestimento), le cui caratteristiche devono essere tali da resistere ad elevate temperature e alle spinte metallostatiche. La cera è, appunto, detta "persa" poiché una fase intermedia prevede che essa sia separata dal guscio. Esso va, infine, separato dal getto da cui si ricava il fuso finale a seguito di lavorazioni meccaniche.

2.1 Origini del processo

Le origini della fusione a cera persa o *investment casting*, anche nota con il nome *cire perdue*, dal francese, risalgono alle prime civiltà nel Medio Oriente come combinazione di arte primitiva, religione e metallurgia [3].

2.1.1 Le prime fusioni

La scoperta che i metalli potessero essere fusi e modellati in stampi fu uno dei maggiori passi avanti verso la civilizzazione fatta dall'uomo. Prima del 4000 a.C., quasi sicuramente indipendentemente in diverse regioni, l'uomo ha imparato a fondere il rame. Il passo successivo è stato fonderlo in semplici stampi aperti fatti in pietra o, meno spesso, in argilla per produrre utensili. Queste prime operazioni sono state indubbiamente svolte in forni grezzi o, al più, con una ventilazione rudimentale. I primi lavoratori del metallo avrebbero avuto la necessità di cooperare con un vasaio per la produzione del crogiolo.

2.1.2 Introduzione della cera

In un periodo indefinito nella metà del quarto millennio a.C., i fabbri ebbero l'idea di prendere un modello scolpito in cera d'api, ricoprirlo con argilla, riscaldare la struttura sia per indurire l'argilla, sia per sciogliere la cera, per poi usare lo stampo così ottenuto per produrre un getto complesso, con ogni dettaglio scolpito o costruito sul modello in cera. I primi getti erano fatti in rame relativamente puro, ma molto presto fu introdotto un rame arsenico, per poi essere seguito da una lega rame-stagno e, poco dopo, dall'oro.

Piccole figure in bronzo e accessori in bronzo per le navi, che avrebbero potuto essere colate solo dal processo a cera persa, così come spille d'oro con teste decorative, provengono dalle prime città di Troia, dove l'accumulo di ricchezza attraeva esperti orafi dell'Asia occidentale.

2.2 Affermazione e diffusione del processo

Era, tuttavia, nella terra di Sumer, la parte meridionale della Mesopotamia tra il Tigri e l'Eufrate, che la metallurgia in generale e la fusione a cera persa in particolare si svilupparono in modo più efficace.



Figura 2.1: *Distribuzione dei popoli del Medio Oriente nel 3500 a.C.*

Nella seconda metà del terzo millennio a.C., la metallurgia è progredita più rapidamente in tutto il Medio Oriente e nell'Egeo e i processi, tra cui la fusione a cera persa, si diffusero in un'ampia area, sebbene le influenze sumere rimangano visibili sia in campo tecnico che artistico. Il commercio, e con esso la trasmissione di idee tecnologiche, si estese in quasi tutte le direzioni dalla Mesopotamia.



Figura 2.2: *Figura di un animale realizzata con la fusione a cera persa*

A ovest, agli inizi del terzo millennio a.C., la conoscenza della metallurgia raggiunse le isole Cicladi e Creta con i coloni che arrivavano probabilmente dall'Anatolia, attratti dalla presenza di modeste risorse di rame, argento e oro, così che la semplice fusione e lavorazione di questi metalli si affermarono.

2.2.1 Prime testimonianze scritte del processo

A cavallo tra il terzo e il secondo millennio a.C., quando in Mesopotamia La Terza Dinastia di Ur raggiunse la stabilità tra il 2100 e il 1950, risalgono i primi documenti, scritti su tavolette di argilla ad opera di scultori e orafi, in cui è abbozzata una descrizione del processo come mostrato in figura 2.3 [4].

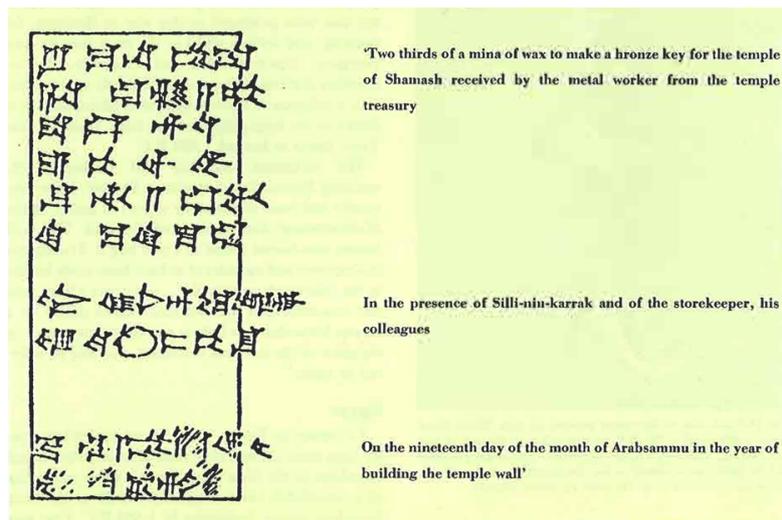


Figura 2.3: Traduzione di una tavola

2.2.2 Europa e il Mediterraneo

Il processo ha fatto la sua comparsa in Europa centrale, dove esisteva una lavorazione del rame già dal 4000 a.C. e dove erano disponibili abbondanti risorse d'oro dalla Transilvania. L'idea della fusione a cera persa potrebbe essere sorta indipendentemente, ma, più probabilmente, potrebbe essere stata portata, insieme ai motivi artistici, dalla rotta commerciale stabilita lungo il Danubio.

In Egitto, nel periodo del Nuovo Regno, a partire dal 1559 a.C., vi sono indicazioni di una notevole evoluzione nell'utilizzo della fusione a cera persa. Tra i più noti, e certamente più fotografati, getti di cera persa di questo periodo ritroviamo la figura in oro massiccio della dea avvoltoio Nekhbet e l'ureo, o cobra di Buto, che decora la fronte della grande maschera funeraria di Tutankhamon.



Figura 2.4: Maschera funeraria di Tutankhamon e figura in oro della dea Nekhbet

I secoli dal dodicesimo al nono a.C. sono caratterizzati da un periodo di crisi, dall'invasione dell'Egitto al collasso dell'impero ittita. Si registra una iniziale ripresa da quando i Fenici assumono il controllo del Miceneo e delle attività commerciali attraverso il Mediterraneo. I loro artigiani produssero un gran numero di figure in bronzo con la cera persa. Essi stabilirono le loro colonie in Sicilia, Sardegna e nelle isole Baleari.

2.3 Evoluzione del processo

I primi artigiani capirono, senza dubbio dai propri errori, la necessità di modellare, in cera, dei canali di colata e corridoi adeguati, per consentire al metallo fuso di fluire facilmente nello stampo. Questi erano di solito attaccati al fondo del modello. Il fabbro avrebbe dovuto costruire anche degli sfiatatoi adatti a consentire la fuga dell'aria durante il colaggio del metallo, ma presto fu in grado di costruire uno stampo sufficientemente poroso utilizzando una giusta miscela di argilla fresca con sabbia, carbone o terra sui pezzi di argilla cotta. I canali venivano poi rimossi e reinseriti nel crogiolo, oppure lasciati sul pezzo, come mostrato in figura 2.5.



Figura 2.5: *Fuso in cui sono ancora presenti i canali di colata.*

A partire dal 600 a.C., gli etruschi avevano risolto il problema della fusione cava, modellando la cera attorno ad un'anima in argilla. L'anima veniva prima creata e riscaldata, poi ricoperta con uno strato di cera sottile tanto quanto lo spessore

del fuso desiderato, per poi incidere i dettagli sullo strato stesso. A seguito del rivestimento con l'argilla e il riscaldamento per indurire lo stampo e sciogliere la cera per evacuarla, il metallo fuso veniva versato nella cavità proprio come prima. Allo scopo di tenere l'anima nella corretta posizione, piccoli chiodi o pezzi di filo, venivano dapprima applicati allo strato di cera, in modo da fuoriuscire fino allo stampo. In genere l'anima veniva rimossa dal getto finito, ma, in altri casi, rimaneva nella medesima posizione. A volte la testa dei chiodi è visibile sulla superficie.

Il metodo finora utilizzato è noto col nome di fusione a cera persa diretta. Una tecnica differente, nota come fusione indiretta, consisteva nel prendere un modello in qualsiasi materiale, anche pietra o legno, per costruire lo stampo, probabilmente in più pezzi, per poi ricoprire le superfici interne con uno strato sottile di cera spennellandola in diverse applicazioni. Questo metodo ha il vantaggio di poter produrre getti molto più grandi ed è, infatti, la procedura tuttora utilizzata per la produzione di statue in oro o bronzo.

I tanti vantaggi della fusione a cera persa, sono accompagnati da un grande svantaggio: è un processo non ripetibile. Ovviamente il modello in cera viene eliminato prima della colata e lo stampo distrutto per estrarre il getto. Già ai primi fabbri era chiaro che per ottenere un incremento della produttività era necessario poter creare rapidamente dei modelli in cera, ciò è confermato dal ritrovamento di piccoli stampi in pietra su cui era possibile applicare la cera per poi essere facilmente modellata, come quelli in figura 2.6.

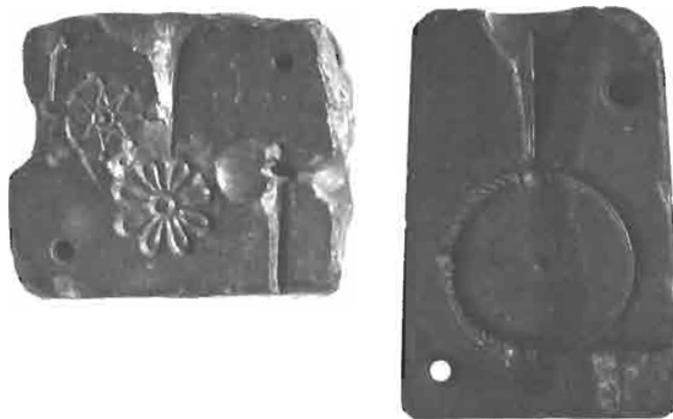


Figura 2.6: *Stampi in pietra*

Un'altra evoluzione del processo base è il cosiddetto *casting-on* di parti di un oggetto. Dall'arrivo dell'età del ferro, quando venivano prodotti pugnali e spade in ferro, era usanza fornire l'arma di un'elsa in bronzo, o talvolta d'argento o d'oro. Era possibile ottenere ciò facendo un modello in cera dell'elsa per circondare il codolo (parte terminale e piatta della lama grezza), per poi ricoprirlo di argilla con

il metodo descritto finora. La colata del metallo fuso, se eseguita correttamente e se si puliva la lama, permetteva un legame metallico tra la lama e l'elsa, ma in taluni casi vi è evidenza di uno strato sottile ossidato tra i due [6].

Per permettere una corretta e facile estrazione del modello in cera dallo stampo, su di esso veniva prima applicato un rivestimento di supporto, tagliato nelle forme opportune, sullo strato di cera, che si univa ad esso grazie alla pressione applicata sullo stampo. Questo tessuto veniva poi bruciato durante la cottura dello stampo, ed evacuato insieme alla cera.

Più tardi, nei primi secoli a.C., si manifestarono due varianti del processo [5]: una consisteva nel pressare un foglio di cera in uno stampo fatto in osso per poi essere ricoperto di argilla e fuso; l'altra, consisteva nel tagliare profonde depressioni, a forma di piramide invertita, nel modello in cera, così l'eventuale getto avrebbe brillato alla luce.

2.3.1 I monasteri e le documentazioni

Nel primo Medioevo, oltre alla gioielleria, nei monasteri comparvero molti metalli ornamentali come calici e reliquiari, prodotti in laboratori direttamente annessi ad essi. Qui, per un fabbro, era facile trovare lavoro e ciò permise un continuo sviluppo del processo. Da una casa benedettina, in Germania, proviene la prima, vera e dettagliata descrizione dell'intero processo della fusione a cera persa. Fu scritta da un monaco che usava il nome bizantino *Theophilus*. Il suo manoscritto fu scritto tra il 1110 e il 1140 da cui si evince chiaramente che egli stesso era un fabbro. Nello stesso secolo, le richieste da parte di monasteri, abbazie e cattedrali per manufatti metallici, cresceva considerevolmente ed esempi di candelabri comparvero in Germania, Francia, Belgio e Inghilterra, fusi in parti tramite il processo di fusione a cera persa e assemblati con bacchette di ferro.

2.3.2 Dal Rinascimento all'epoca moderna

L'inizio del Rinascimento italiano a Firenze nel tardo XIV secolo, riprese il concetto classico di riprodurre l'uomo in statue di pietra, marmo o metallo, riprendendole dalle sculture greco-romane. I materiali maggiormente utilizzati erano bronzo e, di rado, oro, mentre il processo era ancora quello della fusione a cera persa. Successivamente fu maggiormente applicato il metodo indiretto: degli stampi multipli in gesso erano creati attorno al modello in cera dell'artista, messi poi da parte e utilizzati per creare un secondo modello in cera per la fusione, lasciando lo stampo per essere riutilizzato. Poi uno strato di cera era applicata su un modello

in argilla della statuetta dello spessore necessario per poter modellare i dettagli sullo strato stesso. In ogni caso erano necessarie rifiniture considerevoli, prima per rimuovere la gabbia di aste e sostegni, poi per completare i dettagli tramite riempimento e cesellatura e per dare la rifinitura superficiale finale [8].

Nel tardo Rinascimento il nome di Benvenuto Cellini è noto per i suoi trattati dell'oreficeria e della scultura, pubblicati a Firenze nel 1568, in cui fa diversi riferimenti alle varie modifiche apportate al processo della fusione a cera persa. Cellini, inoltre, utilizzò questo processo per realizzare il suo capolavoro "Perseo con la testa di Medusa". La sua scultura, a differenza di quelle fino ad allora realizzate dagli altri artisti, fu realizzata in un unico pezzo, sebbene abbia presentato più di qualche difficoltà, ma risulta, tuttora, un'opera straordinaria.



Figura 2.7: *Dettagli di Perseo con la testa di Medusa*

Durante i secoli XVII e XVIII, la fusione a cera persa veniva impiegata maggiormente per la creazione di piccoli bronzi e gioielleria. La richiesta di piccole sculture crebbe notevolmente dagli inizi del XIX secolo e, per far fronte a ciò, furono adottate alcune meccanizzazioni.

La reale trasformazione da un processo totalmente manuale a un sistema meccanizzato non ci fu del tutto fino al XX secolo, ma non è avvenuto in gioielleria o oreficeria, ma in ambito dentistico.

Il più grande sviluppo nell'industria dell'oro si ebbe a partire dal 1936, quando l'ingegnere danese Thoger Gronborg Jungersen introdusse l'uso di uno stampo flessibile in gomma con cui si potevano produrre un gran numero di modelli in cera e tale innovazione fu adottata anche in ambito industriale. Negli ultimi anni sono stati sviluppati macchinari altamente tecnologici in grado di facilitare una rapida produzione di grandi quantità di piccoli fusi in oro. Oltre a ciò, nuovi tipi di cere e materiali per il rivestimento sono stati introdotti per migliorare ulteriormente l'efficienza del processo e la qualità del prodotto.



Figura 2.8: *Esempio di fusi realizzati con tecniche e materiali moderni*

Capitolo 3

Microfusione

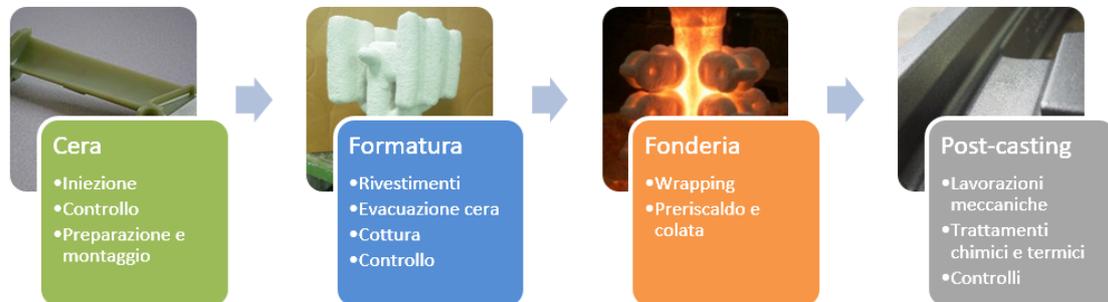
L'impiego di sistemi di meccanizzazione e automazione ha consentito alle moderne industrie l'utilizzo della tecnica della fusione a cera persa per la realizzazione di componenti meccanici su larga scala. La microfusione nasce come una tecnologia di fonderia per la creazione di pezzi di dimensioni ridotte, ma, grazie all'esperienza acquisita, allo sviluppo della robotica e la ricerca di nuovi materiali, oggi si è in grado di ottenere dal processo di investment casting, getti il cui peso supera i 150 kg.

L'odierna industria della microfusione offre prodotti che si differenziano, in base a piccole, ma significative variazioni nel processo, in tre macro tipologie: single-crystal (SC), direzionale (DS) ed equiassica (ES) come in figura 3.1. La prima consente di ottenere un pezzo costituito da un unico grano cristallino, la seconda ha una solidificazione assiale del grano, dando così ai grani un'unica direzione, mentre, la terza, presenta una granulometria a direzione e dimensione variabile su tutto il pezzo. La seguente descrizione tratterà esclusivamente di quest'ultima.



Figura 3.1: *Pale di turbina con ES, DS, SC.*

Il processo consiste in una successione di più fasi che presuppongono materiali, attrezzature, ambiente di lavoro, personale specializzato diversi per ognuna di loro. Una suddivisione iniziale può essere fatta in funzione del reparto in cui si svolgono le operazioni.



3.1 Creazione del modello in cera

La progettazione del processo inizia dal disegno del pezzo da cui si estrapolano le caratteristiche dimensionali. Per la realizzazione del modello si utilizza una resina cerosa, priva di acqua e con una certa percentuale di *filler*, la cui composizione ne determina le proprietà chimico-fisiche: punto di fusione e solidificazione, viscosità, durezza e percentuale di ritiro. La realizzazione del modello avviene tramite l'iniezione di cera allo stato fluido/pastoso in uno stampo che abbia la forma del negativo del pezzo. Il tipo di cera viene scelto a seconda della funzione e della geometria del pezzo: per i componenti IGT (*Industrial Gas Turbine*) è preferibile una cera con bassa viscosità così da aderire adeguatamente all'anima ceramica e per conferire al modello una buona rifinitura superficiale, ma anche un buon riempimento in presenza di pareti sottili.

Il modello in cera riproduce fedelmente le forme e le geometrie del componente a progetto, ad eccezione delle dimensioni: esse sono maggiorate di un coefficiente pari a quello di ritiro della lega. Il fenomeno del ritiro è tipico dei processi fusori, poiché interviene nel passaggio da stato liquido a solido della lega metallica.

Al fine di ottenere le giuste dimensioni, la cavità all'interno dello stampo viene dimensionata utilizzando un secondo coefficiente di ritiro: quello della cera. La conchiglia è costruita in acciaio ed è costituita da stampo e controstampo, le cui geometrie sono studiate per resistere alle pressioni interne sviluppate dalla cera fluida e da quelle esterne, che agiscono per via della pressa idraulica. Il materiale è scelto anche in funzione della resistenza alla corrosione che inevitabilmente deteriora le superfici della cavità. La conchiglia è opportunamente dotata di sfoghi d'aria,

canali di alimentazione per il passaggio della cera, portate d'anima, se necessarie, e foro di iniezione. Lo stampo può presentarsi in un unico pezzo o essere costituito da più parti mobili (figura 3.2): la presenza di sottosquadri nel pezzo rende necessario l'utilizzo di parti articolate che scorrono lungo delle guide, o di parti rimovibili, per consentire una corretta estrazione del modello.

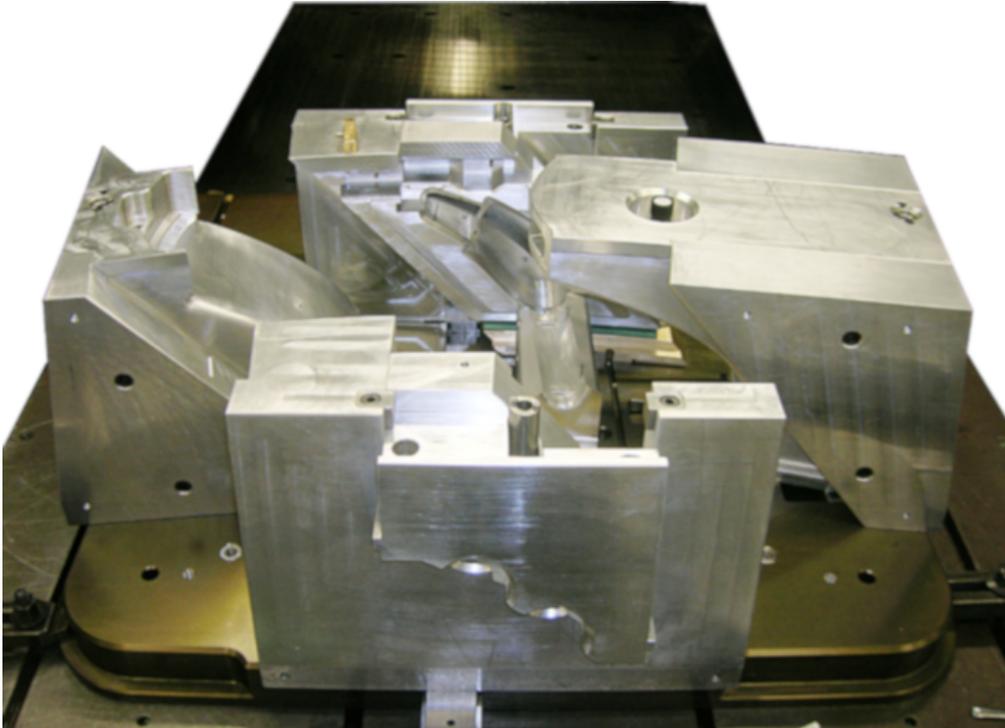


Figura 3.2: *Stampo di una conchiglia per l'iniezione di una pala statorica*

Il controstampo, che ha la funzione di trasmettere il carico di pressione sullo stampo stesso, ha una forma complementare allo stampo e, per le conchiglie costituite da sole due parti, è dotato del negativo di metà del modello. La ragione dell'utilizzo delle conchiglie deriva dalla necessità di avere un'alta ripetibilità e affidabilità, così che ogni modello iniettato sia uguale al precedente. Lo svantaggio sta nell'alto costo di investimento per commissionare una conchiglia e nell'elevato ingombro, poiché queste crescono in funzione della dimensione del pezzo.

3.1.1 Iniezione

Il processo inizia dal posizionamento della conchiglia sul piano di lavoro della pressa idraulica, le cui dimensioni dipendono dal peso e dall'ingombro della conchiglia stessa. La capacità di carico va da diverse decine di kg per le macchine più piccole, fino a 1000 kg per quelle adatte a pezzi di grandi dimensioni.



Figura 3.3: *Pressa idraulica con capacità di sollevamento pari a 1000 kg*

La cera, inizialmente sotto forma di pellet, viene aspirata da una tanica per essere filtrata da eventuali impurità e portata nel serbatoio della pressa; qui la temperatura è impostata ad un valore prossimo a quello di fusione e tale da fornire la giusta viscosità alla cera fluida; stampo e controstampo vengono allineati al di sotto della pressa idraulica per consentire una chiusura precisa durante il ciclo di iniezione, dopodiché il primo viene preparato inserendo, eventualmente, l'anima ceramica nelle opportune portate, necessarie a tenerla nella corretta posizione durante l'iniezione;

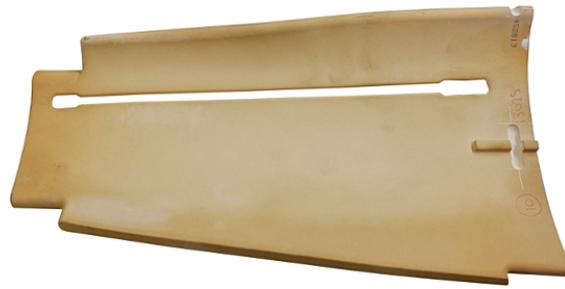


Figura 3.4: *Esempio di anima ceramica da inserire all'interno dello stampo*

sulle superfici della cavità si applica uno spray con funzione distaccante che facilita l'estrazione del modello; la chiusura del controstampo è seguita da un aumento della pressione esercitata dalla pressa, che va dai 70 bar ai 90 bar, e, in alcuni casi, dal riscaldamento della conchiglia stessa, ad una temperatura che si aggira attorno ai 25 °C; un secondo sistema idraulico aziona il pistone che spinge la cera liquida all'interno dello stampo attraverso dei canali e un ugello, anch'essi tenuti ad una temperatura opportuna: la pressione di iniezione segue un profilo variabile a seconda delle caratteristiche e delle problematiche del modello, per un tempo che varia in base al volume di cera richiesto; il ciclo si chiude dopo un tempo di attesa, utile a far solidificare e stabilizzare la cera all'interno dello stampo, su cui agisce ancora la pressione di serraggio.

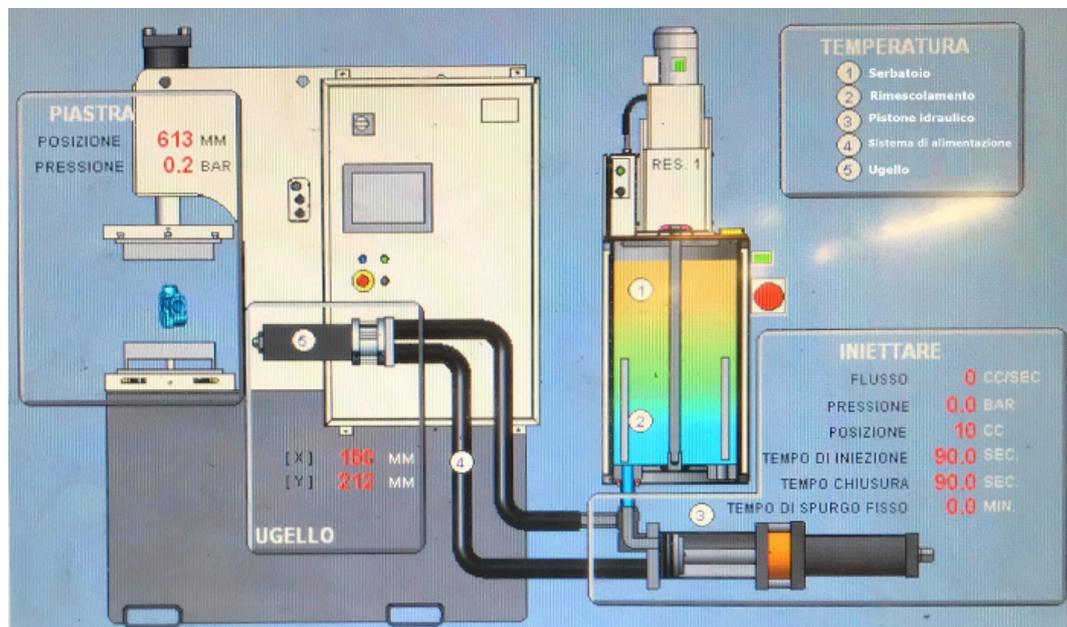


Figura 3.5: *Schema della pressa idraulica*

A seguito dell'estrazione del modello dallo stampo, vengono applicati dei carichi in determinati punti al fine di contrastare le deformazioni dovute alle tensioni residue, che sono conseguenza del raffreddamento.

3.1.2 Controlli

Questa fase del processo richiede un certo numero di controlli poiché ogni difetto o imprecisione presenti sul modello in cera, si ripercuote sulle fasi successive. Il primo controllo si fa sulle anime ceramiche, applicando il blu di metilene, liquido con elevata capillarità, che evidenzia la presenza di eventuali cricche sulla superficie: l'assenza di difetti sull'anima è necessaria in quanto questa, durante la fase di iniezione, è soggetta ai carichi di pressione della cera, con il rischio di rottura. Per assicurarsi dell'integrità di questa a seguito dell'iniezione, il modello è sottoposto ad un controllo ai raggi X e, in caso di presenza di cricche o fratture, il pezzo è inevitabilmente scartato.

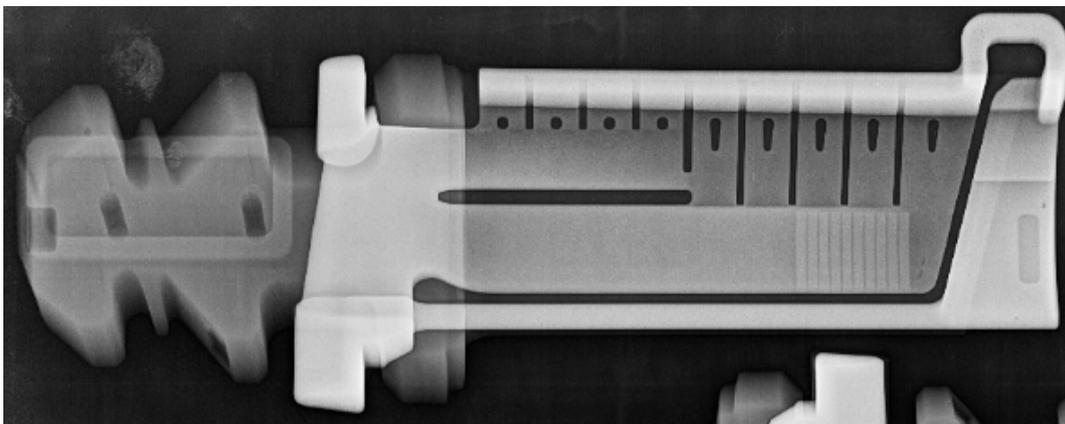


Figura 3.6: *Esempio di lastra eseguita su un pezzi per controllare la presenza di cricche all'interno*

Un altro controllo è di tipo dimensionale ed è fatto sul modello quando ha raggiunto la stabilità: alcune o tutte le quote di progetto vengono misurate manualmente col calibro o tramite una macchina di misura a coordinate (CMM), mentre, in presenza di anima ceramica, si sfrutta il controllo ad ultrasuoni per misurare lo spessore di parete in diversi punti, per assicurarsi che l'anima sia in posizione corretta. Il controllo alla CMM sfrutta un sistema di movimentazione a 6 assi per orientare e direzionare un tastatore per acquisire le coordinate dei punti da misurare, così da poterle confrontare con quelle a disegno; l'UT (Ultrasonic Testing) si avvale del principio di riflessione e rifrazione delle onde sonore nel passaggio da un materiale (cera) all'altro (ceramica), fornendo come output lo spessore dello strato in cera; si effettua la misura in punti definiti, indicati da una maschera la cui forma riproduce ventre o dorso della pala.

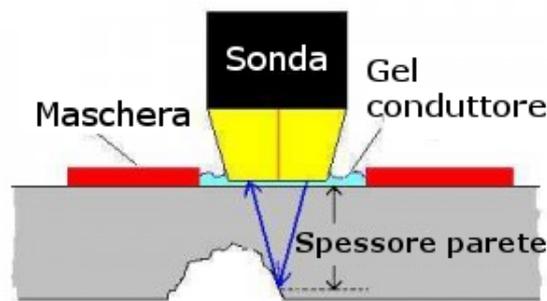


Figura 3.7: Rappresentazione della misura dello spessore tramite UT

Il tempo di permanenza del modello in ambiente dipende dalle condizioni di temperatura e umidità, perciò il reparto adibito alla creazione del modello è dotato di impianti di climatizzazione e filtraggio dell'aria. Questo deterioramento del materiale, nonché delle sue proprietà, rende necessaria una opportuna pianificazione del lavoro in base alla complessità delle azioni da svolgere.

3.1.3 Preparazione e montaggio

Il modello così come si presenta fino a questo punto, non è pronto per proseguire alle fasi successive: su di esso sono necessarie delle operazioni per eliminare gli inevitabili difetti intrinseci alla fase di iniezione, oltre che quelli eventuali derivanti da un'errata combinazione dei parametri di iniezione o danneggiamenti involontari.

Come prima operazione si pulisce la superficie del modello dai residui del distaccante utilizzato in conchiglia, così da permettere l'applicazione di cera per le riparazioni e l'adesione del rivestimento in formatura. Il difetto che si presenta su quasi la totalità dei pezzi in cera è la presenza di linee di separazione dovute allo spazio che intercorre tra i tasselli della conchiglia. La cera, in questo stato, è troppo fragile per poter effettuare delle azioni a freddo, perciò gli operatori si aiutano spennellando una cera calda che rende malleabile la zona da lavorare. In prossimità dell'ugello, durante l'iniezione, sul pezzo si presentano spesso le linee di flusso in superficie che mostrano l'avanzamento della cera. La necessità di rifinire queste zone non deriva solo dal fatto che si vuole evitare che tali difetti si presentino anche sul getto, ma perché comporta una formazione errata del guscio ceramico.

In alcuni casi, in conchiglia, ci sono dei cilindri di sostegno per l'anima ceramica, che lasciano dei fori sul modello, i quali vanno opportunamente riempiti e levigati. Ulteriori fori si possono creare in presenza di bolle d'aria intrappolate nella cera durante l'iniezione o per inefficienza degli sfoghi in conchiglia o per la temperatura

troppo alta della cera; le bolle non costituiscono un apparente difetto superficiale, ma, durante il rivestimento con la matrice ceramica, potrebbero facilmente scoppiare e lasciare un foro, o negativo, che rende il rivestimento non idoneo.

La regola generale per la preparazione del modello è di non lasciare negativi, poiché questi, per la maggior parte delle leghe metalliche utilizzate nel processo, non possono essere saldati, mentre i positivi possono essere molati o rifiniti.

La fase successiva prevede il montaggio del modello su un grappolo, il quale può essere composto da un numero più o meno significativo di pezzi a seconda delle sue dimensioni. Il grappolo è costituito da parti in cera, che si differenziano in colate, colatoi e canali, una campanella in materiale refrattario e valvole.



Figura 3.8: *Grappolo composto da sei palette, in cui si distingue la campanella in basso e il sistema di alimentazione in cera*

Al pezzo si applicano le colate con una particolare cera dotata di proprietà adesive, mentre al colatoio, su una cui estremità sporge una vite filettata, si incolla la campanella centrata con la vite. A seguire, sul colatoio, si montano i pezzi incollando la superficie libera della colata al braccio del colatoio. La disposizione dei modelli sul grappolo è studiata in modo da essere bilanciata e ottenere una solidificazione opportuna del metallo fuso. In punti prefissati si posizionano le valvole che verranno aperte al momento di evacuare la cera.

Il grappolo è pronto per essere rivestito, ma prima si ispeziona per verificare che preparazione e montaggio siano stati eseguiti in modo corretto: si assicura l'integrità del pezzo riparando, laddove possibile, eventuali danni, si verifica che le superfici siano ben pulite e con la miglior qualità superficiale possibile, le sigillature tra le varie parti montate devono essere ben chiuse e con il dovuto raccordo.

3.2 Formatura

I grappoli, dopo aver ottenuto l'approvazione, passano alla fase successiva per il rivestimento. Il guscio in cui colare il metallo fuso viene creato sovrapponendo strati di soluzione con proprietà adesive a base ceramica mista con sabbia. Gli strati, dal primo, che corrisponde a quello più interno, all'ultimo si differenziano per il tipo di soluzione e per la dimensione dei granuli di sabbia utilizzati.

La formatura in guscio ceramico piuttosto che in semplice sabbia, presenta diversi vantaggi:

- elevata accuratezza dimensionale dei getti
- eccezionale finitura superficiale
- riduzione dei costi di finitura
- presenza di angoli di sformo non necessari e assenza di linee di divisione

3.2.1 Rivestimento

Il rivestimento può essere effettuato manualmente o in maniera automatica con l'ausilio di un braccio robotico: il primo modo risulta vantaggioso per pezzi la cui geometria richiede particolare attenzione per un rivestimento di tutta la superficie, come, ad esempio, in presenza di spigoli nascosti; l'utilizzo di un sistema di automazione fornisce al processo di formatura miglior ripetibilità e affidabilità nel tempo e permette di rivestire grappoli il cui peso affaticherebbe l'addetto dopo poche operazioni.

Il guscio ceramico è costituito da più strati, ognuno dei quali ottenuto immergendo prima il grappolo in una soluzione a base ceramica con proprietà adesive, facendo sgocciolare l'eccesso di soluzione; poi il grappolo viene posizionato all'interno di una sabbiatrice 3.9 e rivestito da sabbia, che aderisce allo strato ceramico ancora umido. A questo punto il grappolo viene collocato in un tunnel di essiccazione a temperatura ed umidità controllate per un tempo adeguato a far asciugare opportunamente lo

strato di rivestimento. Al termine di questo tempo di asciugatura, il grappolo è pronto per un nuovo strato, fino ad ottenere lo spessore desiderato.

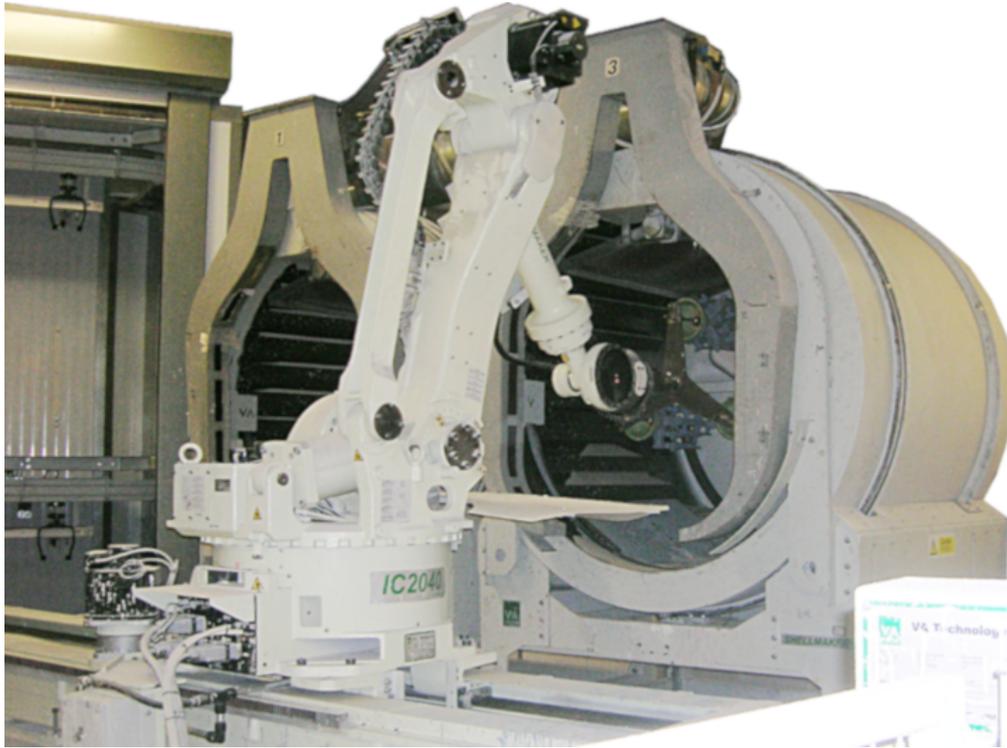


Figura 3.9: Grappolo appena rivestito del primo strato di alluminato di cobalto e di sabbia molto fine

I bagni ceramici sono contenuti in vasche rotanti, necessarie per mantenere in costante agitazione la soluzione, garantendo la corretta miscelazione dei vari soluti che lo costituiscono, evitando in tal modo anche che gli elementi solidi decantino sul fondo della vasca. Non esiste la ricetta tipo per i bagni ceramici, così come per le tipologie di sabbie o il numero di strati da eseguire per ottenere il guscio finale; ogni azienda ha le sue "ricette" e le sue combinazioni di ingredienti, dipendente dalla tipologia di pezzo, dalle sue dimensioni o da particolari caratteristiche che lo contraddistinguono, dal tipo e dalla quantità di acciaio che verrà colato nel guscio.

Solitamente il primo strato è ottenuto immergendo il grappolo in cera in un bagno a base di alluminato di cobalto, su cui viene applicata sabbia molto fine in quanto a contatto con il grappolo in cera. Questo strato di rivestimento, che entra direttamente a contatto con il metallo fuso durante la colata, ha una funzione nucleante, cioè favorisce la creazione del grano cristallino. Tra i vari agenti nucleanti ci sono ossidi ad alto punto di fusione, boruri e nitruri. Per leghe metalliche a base di nichel e cobalto, come nel caso della microfusione di pale di turbina, l'aggiunta di cobalto contenente ossidi, è la scelta migliore. La struttura del grano è correlata ad una reazione di riduzione tra il metallo fuso e il nucleante nella fase di colata.

Con l'alluminato di cobalto $CoAl_2O_4$, per esempio, l'ossido si riduce per formare cobalto metallico. La reazione è innescata dall'affinità degli elementi della lega, come Ti, Al e Cr, con l'ossigeno [2]. Sebbene esistano altri nucleanti, anche con un maggior contenuto di cobalto, l'alluminato di cobalto presenta alcuni vantaggi che hanno convinto quasi la totalità delle aziende che si occupano di microfusione ad utilizzarlo. Esso garantisce una distribuzione costante e omogenea del grano, un facile smaltimento, bassissimo contenuto di impurità ed eccellente rapporto costo/efficienza.

Prima di ricevere il rivestimento successivo, il grappolo staziona in un tunnel a temperatura e umidità controllate per l'asciugatura, dopodiché si immerge prima in due diversi bagni a base di silice colloidale: il primo meno denso, utile soprattutto a bagnare la superficie e consentire la coesione con lo strato precedente, il secondo più denso e viscoso, con maggiori proprietà adesive al fine di garantire uno spessore adeguato e far aderire la sabbia con cui viene successivamente rivestito. I granuli di sabbia hanno un diametro medio crescente, man mano che si passa agli strati successivi: tipicamente si utilizzano tre o quattro differenti dimensioni.



Figura 3.10: *Esempio di rivestimento completo di un grappolo*

Gli strati successivi si ottengono immergendo il grappolo in diversi bagni, tipicamente a base di silice colloidale, ricoprendole con sabbie i cui granuli hanno dimensione crescente man mano che si giunge agli strati più esterni, fino ad ottenere un guscio come in figura 3.10.

Per garantirne la bontà, sono necessari periodici controlli e accorgimenti:

- mantenere il pH ad un valore superiore a 9
- valutare il peso piastra (peso di soluzione che aderisce ad una piastra metallica campione)
- correggere la concentrazione di solidi e la reologia della soluzione
- mescolare di continuo a velocità moderata per evitare la formazione di gel

La giusta combinazione dei parametri come tempo di immersione, quantità e dimensione della sabbia, tempo di asciugatura, proprietà fisico-chimiche dei bagni e numero di strati applicati, conferiscono al guscio le opportune caratteristiche di resistenza, rigidità e permeabilità. Il guscio, in materiale refrattario, resiste alle spinte metallostatiche e alle alte temperature della lega fusa, ma deve consentire anche una corretta fuoriuscita dei gas, un raffreddamento uniforme e non deve ostacolare il ritiro del metallo nella fase che intercorre tra quella liquida e quella solida.

3.2.2 Evacuazione

Dopo aver applicato l'ultimo strato, il grappolo asciuga per un tempo più lungo, fino a perdere quasi del tutto l'umidità presente. A questo punto il guscio va liberato dalla cera così da lasciare la forma libera per la colata. Tale fase viene eseguita in autoclave, dove il vapore raggiunge una temperatura di 150-170 °C e una pressione di 7-9 bar.



Figura 3.11: Autoclave con relativo sistema di aspirazione dei vapori

Il grappolo poggia sulla campanella, da cui la cera può fuoriuscire liberamente quando si raggiunge la temperatura di fusione. Nei casi in cui non sia sufficiente una sola apertura, il grappolo è dotato di valvole di sfogo (come già accennato precedentemente), a questo punto ricoperte anch'esse dal guscio, aperte dall'operatore prima dell'evacuazione.

Si utilizza l'autoclave piuttosto che un semplice forno perché il vapore ad alta pressione permea nello strato ceramico attenuando il gradiente termico tra esterno e interno, così da limitare la formazione di cricche; inoltre, con l'innalzamento della temperatura, la cera aumenta di volume, premendo contro le pareti del guscio col rischio di criccarlo; l'alta pressione contrasta questa crescita volumetrica e velocizza l'evacuazione della cera, che viene raccolta e restituita al fornitore per il suo recupero.

3.2.3 Cottura e controllo

L'evacuazione è seguita da una fase di preparazione del guscio al fine di conferirgli le giuste proprietà per ottenere colata e solidificazione corrette. Per eliminare ogni residuo di cera dall'interno del guscio, il grappolo subisce una cottura a 800-900 °C in un forno a temperatura variabile, per attenuare il gradiente termico. A tale temperatura la cera brucia completamente, mentre il guscio ceramico subisce una sinterizzazione che gli conferisce le proprietà meccaniche necessarie a sopportare il processo di colata.

Le ceneri residue della combustione della cera potrebbero sporcare le pareti del guscio o depositarsi laddove siano presenti angoli di sottosquadro non desiderati, come nel caso di eccesso di cera tra campanella e colatoio. A tal proposito il guscio subisce un controllo visivo sia interno, con un endoscopio, che esterno: ci si assicura che lo strato ceramico interno non abbia subito danni o cedimenti, che l'anima ceramica sia integra e in posizione e che non siano presenti cricche sulle pareti esterne, poiché potrebbero cedere sotto il peso del metallo colato.

Infine si ricoprono le parti del grappolo di cui si vuole ritardare la solidificazione con alcuni strati di fibra ceramica, resistenti alle alte temperature, che hanno la funzione di isolare l'interno dall'ambiente esterno.

3.3 Fonderia

I grappoli conformi vengono allineati in un forno, detto di preriscaldamento, per portarli ad una temperatura solitamente compresa tra i 950 °C - 1150 °C. Tali temperature sono raggiunte dopo un certo tempo, mentre inizialmente è impostata ad un valore

più basso. Portare il guscio ad una temperatura vicina a quella che avrà il metallo fuso quando colato evita che esso subisca uno shock termico e permette al metallo di solidificare con la giusta velocità. La fase di colata si distingue, fundamentalmente, in due tipi: in aria e in vuoto.

3.3.1 Forno Roll Over

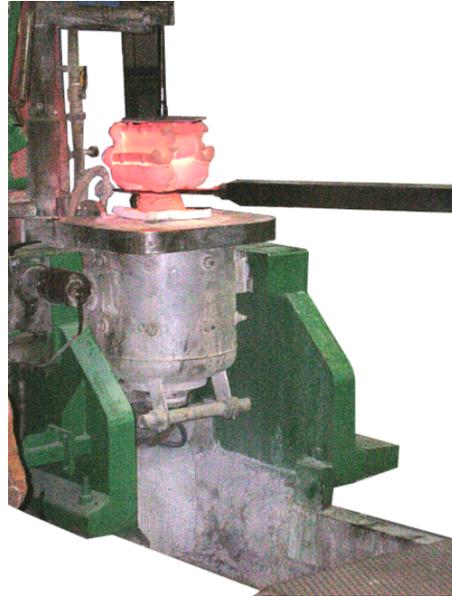
Un tipo di forno in aria è costituito da un crogiolo avvolto da una bobina su un meccanismo in grado di fornire una rotazione di 180° , chiamato per questo Roll-Over; un sistema di condotte permette all'operatore di riversare argon, inerte e non solubile nel metallo fuso, liquido o gassoso, nel crogiolo così da isolare il pelo libero del metallo, altamente reattivo, dall'ossigeno dell'aria. Il forno viene attivato regolando la potenza elettrica nella bobina, in cui passa una corrente tale da generare un campo magnetico indotto al suo interno, proprio dove viene posizionato la billetta di lega metallica del peso necessario a riempire il guscio; il campo magnetico indotto genera una corrente nel lingotto che lo fa scaldare per effetto Joule, fino a farlo fondere; si controlla l'esatta temperatura del metallo con una termocoppia, finché non si raggiunge quella desiderata; si imposta una potenza di mantenimento per tenere costante la temperatura della lega; il guscio viene estratto dal forno tramite un manipolatore a forza movimentato dagli operatori di fonderia e viene posizionato e bloccato con la campanella sul crogiolo, in una configurazione studiata in precedenza; si attiva il meccanismo di rotazione a velocità controllata e il metallo fuso si riversa completamente nel guscio.

Il grappolo viene infine prelevato dall'operatore e posto al di sotto di un impianto di aerazione per aspirare i vapori caldi; talvolta si sceglie di utilizzare una polvere esotermica da inserire nella campanella, che incendiandosi scalda la superficie del metallo allo scopo di spostare il baricentro termico il più possibile verso l'alto e ridurre la profondità dei coni di ritiro primari e secondari nel fuso.

Durante questo tipo di colata, la velocità di rotazione del crogiolo è impostata a un valore tale da evitare, all'interno del guscio, la formazione di difetti quali fusioni incomplete o giunti freddi conseguenti alla fluidodinamica interna.



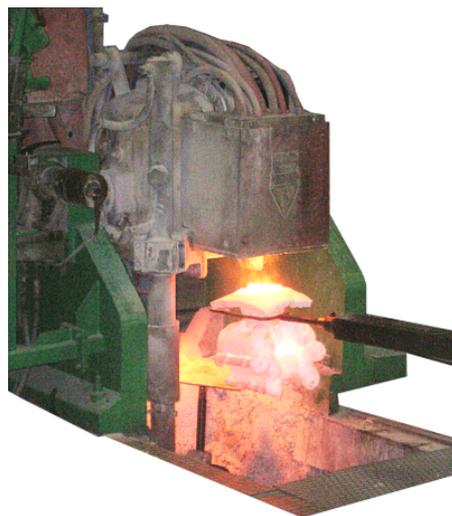
(a) Argon versato nel crogiolo



(b) Posizionamento del guscio pre riscaldato



(c) Rotazione completa



(d) Estrazione del pezzo

Figura 3.12: Sequenza di colata con forno Roll Over

3.3.2 Forno a vuoto

Il forno a vuoto differisce da quello ad aria per complessità, capacità di carico, efficienza e architettura. Esso si presenta con due camere stagne, una più grande sormontata dall'altra, messe in comunicazione da un portellone (comunemente detto flap). Quella più in basso ospita il guscio in cui verrà colato l'acciaio e, una volta inserito all'interno della camera e generato il vuoto, esso viene sollevato da un sistema a pantografo fino all'altezza desiderata: il centraggio è fondamentale per consentire al metallo fuso di colare precisamente nella campanella; la seconda camera contiene il crogiolo avvolto in una bobina, fissato ad un meccanismo di rotazione e traslazione ad alta precisione.

Un operatore lavora al livello della prima camera, con la funzione di spostare, mediante un braccio, il guscio dal forno di preriscaldamento al piano presente nella camera, nel minor tempo possibile, ma, allo stesso tempo, con la maggior precisione possibile. Il secondo operatore è al livello della seconda camera e ha il compito di alimentare il crogiolo con il giusto quantitativo di metallo, azionare la pompa a vuoto prima nella camera che ospita il crogiolo, poi in quella in cui c'è il guscio, regolare la potenza elettrica nella bobina per fondere l'acciaio e controllare la temperatura del metallo attraverso un pirometro ottico, in grado di percepire l'emissione radiativa del metallo incandescente e calcolarne la temperatura; tale strumento va tarato dopo un certo numero di cicli con una termocoppia ad immersione per garantire la lettura corretta della temperatura, tramite aggiustamento del coefficiente di emissività. Quando le due camere raggiungono una pressione quasi uguale, del valore di 10^{-3} - 10^{-2} Torr, il flap si apre per mettere in comunicazione le due camere; l'operatore aziona la rotazione del crogiolo a velocità e fino all'angolo preimpostati così da far defluire il metallo nel guscio; la lega fusa si riversa completamente nella campanella, in cui è possibile inserire, precedentemente, un filtro ceramico utile a limitare le turbolenze del flusso caldo che condurrebbero alla formazione di bolle di gas all'interno del pezzo; estrazione dal forno e raffreddamento del getto sono del tutto simili al caso precedente.

I principali vantaggi del forno a vuoto si possono riassumere nei seguenti punti:

- assenza (o riduzione) di impurità dovute all'ossidazione della lega fusa
- minori quantità di gas disciolti nella lega
- maggiore capacità di carico
- maggiore ripetibilità del processo legata all'automazione dei parametri di fusione e movimentazione del crogiolo in fase di colata.

3.4 Post-casting

Il guscio estratto dal forno si presenta in colore arancio incandescente a causa dell'alta temperatura del metallo contenuto all'interno. Esso raffredda gradualmente e inizia a ritirarsi per effetto della transizione liquido-solido. In questo stato il metallo presente nel colatoio, di cui si ritarda appositamente la solidificazione tramite coibentazione del grappolo e aggiunta di polveri esotermiche, alimenta il resto del pezzo, il completo riempimento del guscio ceramico; tale fenomeno è visibile nella sezione della colata in cui si distingue il tipico cono di ritiro.

La contrazione del manufatto comporta, in alcuni punti, la rottura del guscio, il quale non deve in alcun modo ostacolarlo, onde evitare cricche o deformazioni del fuso.

Il getto ottenuto dalla colata necessita di una sequenza di lavorazioni e trattamenti sia per avere il pezzo finito con le corrette proprietà fisiche e meccaniche, sia per correggere, dove possibile, eventuali difetti, tra cui ritroviamo molti di quelli tipici dei processi fusori [7]:

- porosità: presenza di discontinuità all'interno del materiale a livello microscopico, conseguenza;
- bolle: a seguito del raffreddamento del metallo, i gas disciolti nella lega fusa si liberano e formano delle bolle all'interno del materiale; la presenza di gas all'interno del getto può derivare dalla turbolenza del flusso della lega fusa durante la colata; essa è notevolmente influenzata sia dalla temperatura del metallo colato che dal tempo complessivo di colata;
- inclusioni di guscio ceramico: quando la superficie interna del guscio ceramico presenta irregolarità o angoli a spigolo vivo, il flusso del metallo, durante la colata, può asportare frammenti di guscio che si ritroveranno nel pezzo come inclusione;
- giunzione fredda: quando due fronti d'acciaio riempiono una cavità da due direzioni diverse e sono in uno stato molto prossimo alla solidificazione, non si uniscono del tutto e resta una visibile discontinuità;
- cricche in superficie: si manifestano quando le tensioni residue superano quella di rottura del materiale in presenza di un guscio molto rigido.
- riempimento incompleto: il flusso del metallo fuso potrebbe solidificare prima di riempire tutto il guscio in punti in cui il raffreddamento può risultare più rapido che in altri, ad esempio in presenza di piccoli spessori (bordi d'uscita).

3.4.1 Lavorazioni e rifiniture

Quando il guscio si è sufficientemente raffreddato, si separa il getto dal guscio mediante distaffatura: tramite un getto d'acqua o con martello pneumatico si rimuove gran parte del guscio ceramico, infragilito dalle fasi precedenti. I residui di rivestimento ceramico vengono totalmente eliminati con la granigliatura, utilizzando delle piccole sfere metalliche sparate ad una certa velocità contro il pezzo. Il getto si presenta nella stessa forma del grappolo in cera, quindi ai veri e propri componenti sono attaccate le colate, successivamente separate tramite troncatura a disco. I residui metallici delle parti tagliate o eventuali difetti in positivo, sono eliminati tramite sbavatura, fino ad ottenere una superficie omogenea. La sabbiatura conferisce la giusta rifinitura superficiale ed elimina il residuo dello strato nucleante del guscio ceramico.

3.4.2 Attacchi chimici e trattamenti termici

Sul pezzo si possono effettuare diverse operazioni: pulizia in potassa, attacco macro, trattamento termico, hipatura.

Se è presente l'anima ceramica all'interno, si immerge il pezzo in una soluzione alcalina a base di potassio (detta perciò potassa), in un serbatoio ad alta pressione e ad una temperatura superiore ai 150 °C; la giusta combinazione di tali parametri permette la dissoluzione chimica dell'anima, ceramica o in quarzo, al fine di lasciare libera la cavità all'interno che andrà a costituire il sistema di raffreddamento della pala; i pezzi vanno immediatamente risciacquati prima di essere immersi in una vasca a base di acido nitrico (HNO_3) per la neutralizzazione; si risciacqua ancora prima dell'asciugatura, in acqua a 60 °C - 70 °C.

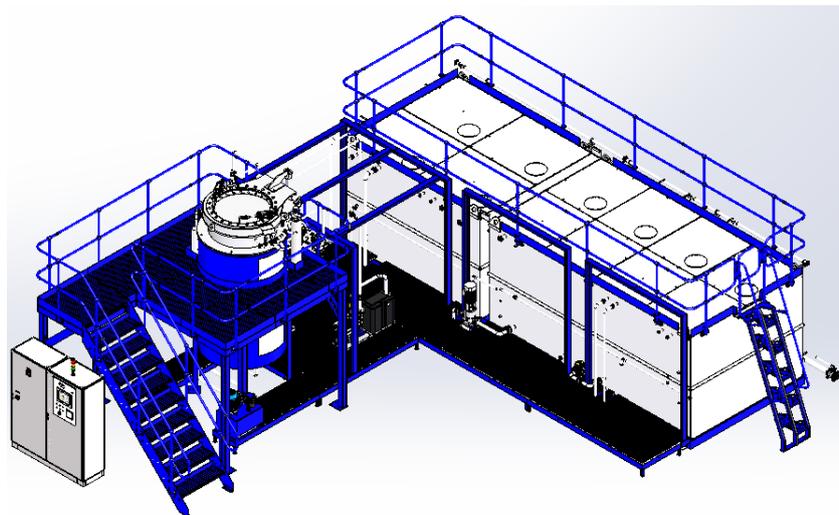


Figura 3.13: Schema impianto per potassa

Per controllare la distribuzione e la dimensione dei grani sul pezzo, si procede con un'analisi macrografica, immergendo il pezzo in una serie di vasche: la prima contiene una soluzione di acido cloridrico e cloruro ferrico, capace di far emergere sulla superficie del pezzo, precedentemente sabbiata, i contorni dei grani; le successive servono per il risciacquo, effettuato per immersione in acqua, per ripulire la superficie dai residui della soluzione; l'altra contiene una soluzione basica di carbonato di sodio per la neutralizzazione; l'ultima vasca è utilizzata per un ulteriore risciacquo e, infine, si caricano in un forno per l'asciugatura.



Figura 3.14: *Sezione di pala dopo attacco macro*

Dimensione, orientamento e distribuzione dei grani dipendono dalla fase di raffreddamento della lega: se il metallo raffredda rapidamente, i grani cristallini hanno meno tempo per accrescere, ottenendo una dimensione ridotta dei grani; la direzione di raffreddamento determina la loro orientazione, che, per questo processo, non ha una direzione preferenziale, ma deve comunque avere una distribuzione omogenea e un gradiente di accrescimento controllato.

Per conferire alla lega metallica migliori proprietà meccaniche, si può procedere con un trattamento termico, facendo agire sul pezzo un determinato ciclo di riscaldamento e raffreddamento per un tempo stabilito.

Per ovviare al problema della porosità, comune a tutti i processi fusori, si può operare con il processo di HIP (Hot Isostatic Pressing): il pezzo è posto in un serbatoio contenente gas inerte (tipicamente Argon) ad elevate pressione (100-200 MPa) e temperatura (900-1250 °C); l'azione simultanea di questi due parametri permette di eliminare gran parte delle microporosità attraverso la combinazione di deformazione plastica, scorrimento viscoso e diffusione atomica. Si verifica un conseguente aumento della densità e della resilienza del pezzo, mentre gli effetti benefici si riscontrano soprattutto sulla vita a fatica e tenacità a frattura, influenzate dalla presenza di discontinuità nel pezzo.

3.4.3 Controlli specifici e dimensionali

Sui pezzi ottenuti si effettuano una serie di controlli a campionatura o sull'intera popolazione, di cui non tutti sono dei controlli non distruttivi. Tra i controlli distruttivi abbiamo: prova meccanica a trazione, controllo di alcune sezioni della pala, controllo della microporosità. Mentre tra i controlli non distruttivi abbiamo: innanzitutto un primo controllo visivo, poi controlli ai raggi X e con liquidi penetranti.

Le analisi sulle caratteristiche del materiale del pezzo sono utili a comparare i risultati ottenuti con quelli del materiale base. La prova a trazione restituisce un grafico $\sigma - \varepsilon$ (tensione - deformazione) da cui è possibile estrapolare le principali proprietà meccaniche del materiale come rigidità, tensioni di snervamento e di rottura.

Dal pezzo si estraggono, mediante taglio, diverse sezioni di cui si vuole controllare il grado di microporosità per confermare la scelta dei parametri della fase di colata. Spesso il taglio è fatto lungo una o più sezioni della pala per caratterizzare il profilo.



Figura 3.15: *Taglio di una sezione*

Le sezioni vengono allocate in una resina come in figura 3.15 e la sua superficie viene lucidata tramite un opportuno trattamento. A questo punto il campione è pronto per essere analizzato mediante microscopio ottico, tramite cui è possibile

rilevare la presenza delle microporosità, visibili grazie al contrasto di riflessività tra il metallo lucido e la porosità, che si presenta come una discontinuità della lega. In allegato al disegno del pezzo ci sono una serie di requisiti su dimensione e distribuzione delle microporosità all'interno delle sezioni stabilite.

Il controllo con i liquidi penetranti si effettua per rilevare la presenza di inclusioni, discontinuità o cricche in superficie non visibili ad occhio nudo, che sono quindi sfuggiti ad un primo controllo visivo. Il principio di funzionamento di questo controllo è legato alla capacità di penetrazione del liquido impiegato, tra le cui proprietà ha quella di un'elevata capillarità: si applica il liquido penetrante sulla superficie da indagare mediante immersione, spray o con un pennello; dopo un certo tempo di attesa, utile a permettere al liquido di riempire tutte le fessure, si pulisce la superficie dai residui del liquido, così che resti soltanto quello penetrato; si cosparge la superficie con un secondo agente, un mezzo di contrasto detto rivelatore, la cui funzione è quella di far riaffiorare il liquido depositato nelle discontinuità; l'operatore specializzato, con l'ausilio di una lampada a luce ultravioletta, rileva la presenza di macchie fluorescenti (figura 3.16) e le esamina per valutare se siano o meno dovute ad un difetto. Punto cruciale di questo controllo è la pulizia del pezzo prima di applicare il liquido penetrante, poiché deve essere, sin dall'inizio, privo di ogni residuo di lavorazioni precedenti o grassi che possano occludere le micro fessure.



Figura 3.16: *Pezzo esposto alla luce UV in cui si evidenziano dei difetti superficiali*

Per individuare la presenza di inclusioni o bolle interne al pezzo si effettua un controllo ai raggi X: un fascio di radiazioni colpisce il pezzo posto su una lastra (analogica o digitale) che viene impressa con i raggi che oltrepassano il metallo; in base al potere di penetrazione richiesto, che dipende dal materiale e dalla dimensione del pezzo, si impostano potenza, tempo di esposizione e intensità di corrente al fine di ottenere un contrasto adeguato. Il controllo è effettuato da operatori specializzati, i quali hanno il compito di riconoscere sulla lastra i difetti o le imperfezioni.

La fase conclusiva del processo di microfusione prevede l'ultimo controllo dimensionale per assicurarsi che il pezzo sia conforme alle richieste del disegnatore. Ci sono a disposizione diversi strumenti di misura di cui l'operatore può avvalersi, tra cui troviamo:

- calibro: utile per la misura di lunghezze o distanze tra parti del pezzo;
- ultrasuoni: in presenza di cavità all'interno della pala, permettono di ottenere una misura precisa dello spessore di parete, misurato in punti distribuiti su diverse sezioni della pala stessa;
- CMM: un dispositivo automatico acquisisce le coordinate di punti, curve e superfici mediante contatto di un puntatore, direzionato da un sistema di movimentazione a 6 assi, con il pezzo;
- scanner 3D: tecnica di fotogrammetria per la creazione di un modello matematico che coincida con la superficie esterna del pezzo per poterlo confrontare con la forma a progetto.

Capitolo 4

Strumenti di controllo dimensionale

Nell'ambito dell'ingegneria dimensionale, l'analisi dei risultati ottenuti dalle misurazioni dei pezzi, sia durante lo sviluppo che nella produzione standard, è argomento centrale per attestarne la conformità. L'ingegnere ha a disposizione una serie di dati utili a prendere determinate decisioni al fine di garantire il miglior risultato possibile con un'ottima ripetibilità. Conoscere gli strumenti di misura è tanto importante quanto conoscere ogni fase del processo per determinare entità e causa dell'errore. A tale scopo sono di seguito descritte le due principali modalità di misura: CMM e scansione 3D.

4.1 Misura a coordinate

La macchina di misura a coordinate (CMM) è uno strumento di misura capace di acquisire le coordinate di punti predeterminati del pezzo mediante contatto di questo con un tastatore. La macchina è costituita da un bancale rigido su cui è definito un volume di misura, un sistema di movimentazione sui tre assi guidato da una serie di trasmissioni e cuscinetti e un secondo sistema di movimentazione che regola la rotazione attorno ai tre assi; una consolle permette all'operatore di effettuare manualmente le manovre, mentre il software dedicato guida il sistema in autonomia nella rilevazione dei punti; il tastatore può avere diverse conformazioni, il più comune è costituito da un'asta rigida in fibra di carbonio alla cui estremità è presente una sfera di diametro ad alta precisione; esso è fissato mediante un magnete al porta tastatore che è in grado di percepire, mediante dei cuscinetti, il contatto ed è mosso dal secondo sistema di movimentazione tramite un motorino elettrico interno ad alta precisione.

Il programma è in grado di ricevere in input il modello matematico del pezzo e le coordinate dei punti, delle curve e delle superfici di cui si desidera conoscere la misura; si definisce inizialmente la posizione e l'orientazione del pezzo fissato su un sostegno nel centro del volume di misura della macchina, come in figura 4.1, poi si gestisce l'orientazione del tastatore durante l'acquisizione in modo da evitare collisioni con l'oggetto.



Figura 4.1: *Pala rotorica misurata da CMM*

Il movimento del tastatore può essere differenziato in due tipologie: la prima è necessaria a raggiungere il punto, seguendo un tragitto efficiente e in totale sicurezza, mentre la seconda è impostata in modo da ottenere una misura più precisa possibile. Le prime acquisizioni sono necessarie alla macchina per registrare esattamente la posizione e l'orientazione del pezzo per poter sovrapporre i due sistemi di riferimento, quello della macchina, la cui origine si trova in uno degli angoli del volume di misura, e quello del pezzo, definito a progetto.

Per la ricerca dei punti per l'allineamento, il programma si basa sull'orientazione dell'acquisizione precedente ed è perciò necessario che il pezzo sia posizionato

nello stesso modo ogni volta, mentre la prima operazione può essere effettuata manualmente. Ci sono diverse modalità per allineare il pezzo con il modello matematico, la CMM utilizza la posizione di punti e della direzione della normale alla superficie, calcolata acquisendo una serie di punti nell'intorno del punto stesso. La posizione di questi punti serve a bloccare i gradi di libertà fino ad ottenere posizione e orientazione nello spazio in maniera univoca. Quantità e coordinate dei punti sono impostate in base al disegno allegato.

La meccanica ad alta precisione, l'utilizzo di cuscinetti e smorzatori per le vibrazioni, insieme all'implementazione di un software ottimizzato, rendono la CMM uno strumento di misura ad altissima precisione, il cui errore varia da uno a pochi μm , a seconda delle dimensioni del volume di misura. Il tempo di acquisizione dipende più che dalle dimensioni del pezzo, dal numero dei punti di misura. Con un software parallelo è possibile definire le caratteristiche (linea media, corda, spessore al bordo d'uscita ecc.) dei profili delle pale dopo aver acquisito lo stesso come elemento "curva".

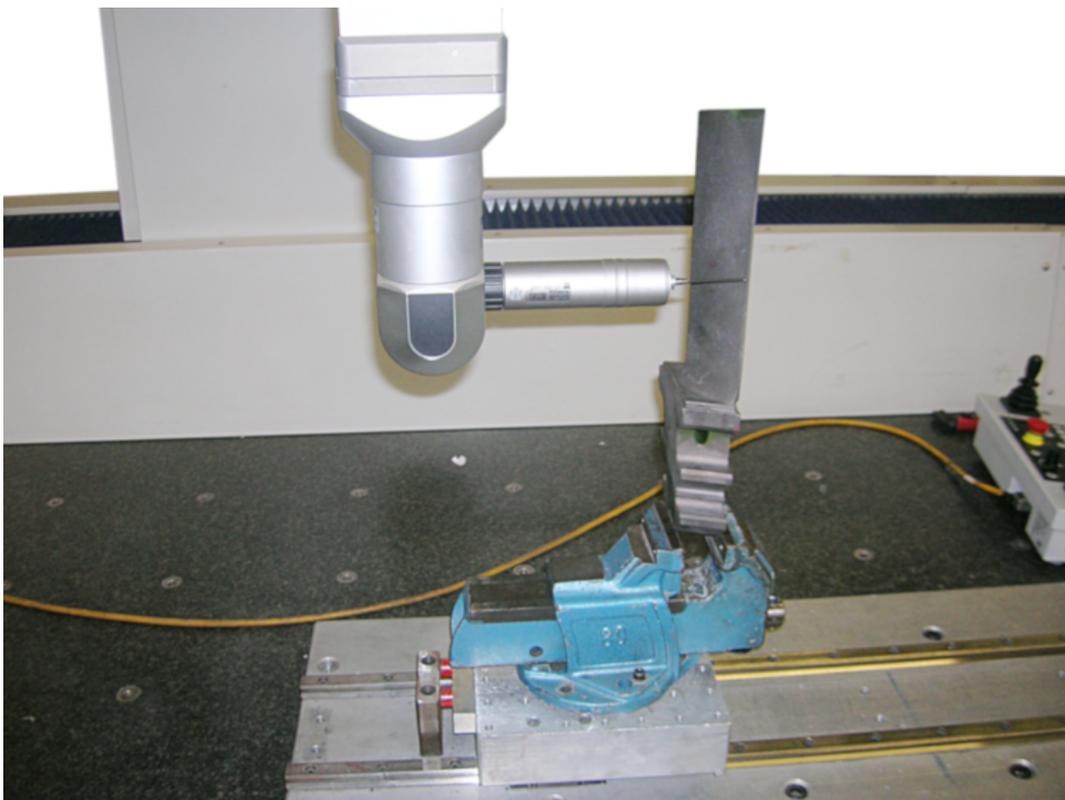


Figura 4.2: *Contatto del tastatore con la pala durante l'acquisizione*

La forma e la dimensione del tastatore, come quello in figura 4.2, dipende dalla configurazione del pezzo e dalla sua dimensione: ci sono tastatori di lunghezza differente e con diametri differenti della sfera sull'estremità, tastatori a forma di T

per la misura di raggi e altre forme speciali. La macchina necessita di periodiche tarature per definire correttamente l'origine e l'orientazione degli assi del sistema di riferimento macchina: tale operazione è svolta ponendo una sfera di un materiale molto rigido, resistente alle abrasioni e con un basso coefficiente di dilatazione termica, per garantire l'esatta misura del raggio e la perfetta sfericità nel tempo; si effettua la misura di tale sfera con un apposito tastatore, le cui dimensioni sono note al software, acquisendo un determinato numero di punti, curve e superfici, in base al livello di taratura desiderato. Il secondo tipo di taratura è fatto sul tastatore ed è un'operazione utile da effettuare ogni volta che si cambia il tastatore con un altro: si utilizza la stessa sfera rigida e il tastatore da utilizzare per le acquisizioni successive.

Il sistema di misura a coordinate è spesso utilizzato per certificare un secondo metodo di misura, comparando i risultati ottenuti con i due metodi. Sebbene tale operazione sia fatta dal produttore stesso delle macchine del sistema di misura, può essere utilizzato una tantum per assicurarsi che il metodo di acquisizione sia corretto e che possa costituire una valida alternativa alla CMM stessa, laddove non sia necessaria una precisione elevata o sia conveniente per altre ragioni.

4.2 Scansione ottica 3D

Lo scanner 3D viene utilizzato nell'ambito della metrologia per la ricostruzione di un modello matematico che rappresenti fedelmente la superficie esterna dell'oggetto scansionato. Tale operazione, gestita da un software dedicato, è preceduta dall'acquisizione di una nuvola di punti dallo scanner stesso.

L'intero sistema è costituito da tre principali sottosistemi:

- scanner con relativo sistema di orientazione e movimentazione
- sistema di orientazione dell'oggetto
- calcolatore

L'utilizzo di accessori secondari ottimizzano o facilitano l'acquisizione dei punti, mentre altri si rendono necessari, come, ad esempio, una tavola per la calibrazione.

Lo scanner può avere diverse dimensioni e configurazioni in base alla potenza di calcolo necessaria e alla precisione che si vuole ottenere. Sebbene il principio di funzionamento non dipenda strettamente dal tipo di scanner, la configurazione descritta di seguito è rappresentativa di uno scanner ottico fornito di due videocamere e un proiettore.

La macchina è costituita da una o più videocamere ad alta risoluzione, poste ad una distanza fissa l'una dall'altra e con un certo angolo di deviazione, se presenti in coppia, mentre nel centro è presente il proiettore su cui è montata una lente fornita in allegato per ogni tipo di videocamera: queste si differenziano essenzialmente per la loro capacità di acquisizione, identificabile con il volume di misura, determinato dalle dimensioni e dalle caratteristiche geometriche della lente e dalla lunghezza dell'obiettivo. Il volume di misura corrisponde alla regione dello spazio in cui le videocamere sono in grado di acquisire e rilevare i punti, tra cui rientrano anche i cosiddetti marcatori, come rappresentato in figura 4.3.

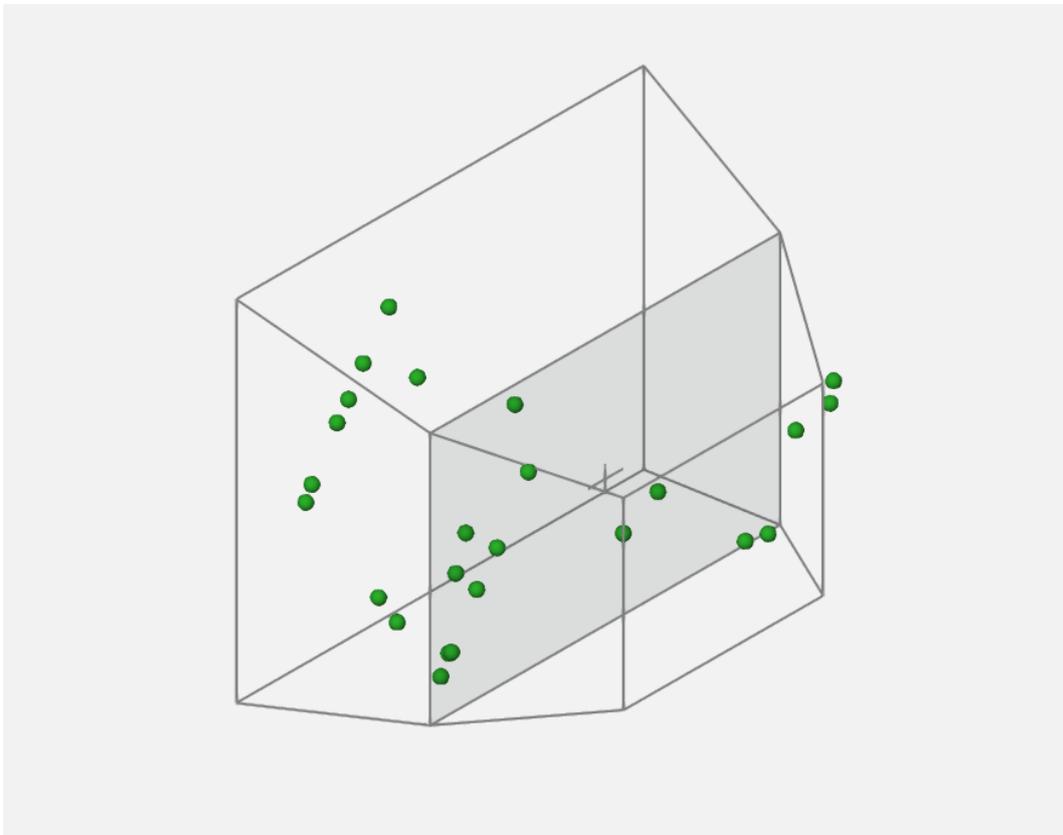


Figura 4.3: *Rappresentazione del volume di misura e con presenza di marcatori*

Lo scanner è sostenuto da un braccio a movimentazione automatizzata o manuale, che permette di posizionare lo scanner a quota e distanza desiderate rispetto all'oggetto e di orientarlo secondo i tre assi entro un sufficiente range di angoli. Per consentire la completa acquisizione dell'oggetto, questo è posizionato rigidamente su una piattaforma rotante montata su un motore ad alta precisione, il cui controllo è affidato all'operatore o al software. Infine è presente una postazione di lavoro, fornita di un calcolatore la cui potenza di calcolo, soprattutto grafica, permette di elaborare migliaia di dati in breve tempo e di gestire tutti i sistemi sopraelencati.

Il principio di funzionamento è basato su diverse leggi fisiche e ottiche, la cui combinazione rende molto versatile questo sistema di misura. L'acquisizione dei punti avviene mediante proiezione di luce strutturata, ovvero di modelli a frange parallele sulla superficie in vista del pezzo, le cui curvature determinano una deformazione delle frange stesse, riprese dalle videocamere ed elaborate per ottenere le coordinate (x,y,z) di migliaia di punti per scansione. Il motivo delle frange, visibili in figura 4.4, è costituito da una serie di fasce illuminate e non illuminate che si alternano nel tempo, con una frequenza definita dal tempo di esposizione impostato per le videocamere.

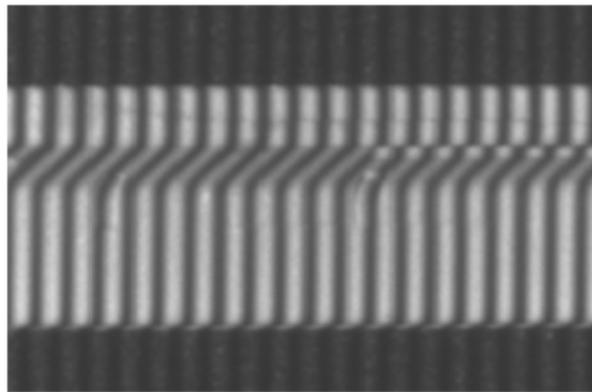


Figura 4.4: *Rappresentazione delle frange proiettate su una superficie*

Il proiettore sfrutta una tecnologia di emissione di luce blu, ovvero in un ristretto range di lunghezza d'onda, così da permettere alle videocamere di filtrare, mediante apposite lenti polarizzate, la luce proveniente dall'ambiente circostante ed acquisire soltanto quella proiettata, ovvero riflessa dalla superficie inquadrata. Il metodo di determinazione della posizione dei punti si basa sul principio di triangolazione, che sfrutta angoli e distanze per il calcolo delle coordinate con regole trigonometriche.

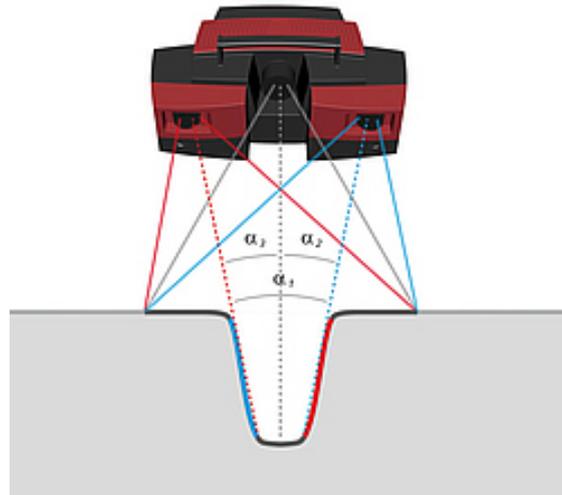


Figura 4.5: *Rappresentazione del principio di triangolazione*

La scansione completa di un oggetto è possibile con una successione di scansioni da angolazioni e posizione differenti. Le coordinate dei punti sono calcolate in base ad un sistema di riferimento solidale allo scanner, così che ogni scansione fornisca una nuvola di punti distribuiti nello spazio come la superficie del pezzo. Per tale ragione ogni scansione deve tener conto del fatto che l'orientazione dello scanner o del pezzo è variata e tale operazione è gestita dal calcolatore, ma è possibile solo se sono stati applicati i marcatori sul pezzo, sul frame di sostegno o su una gabbia contenente il pezzo. Il marcatore è tipicamente un adesivo di forma circolare in cui si distingue un cerchio bianco contornato da una corona circolare nera per creare contrasto e renderlo ben visibile alle videocamere.



Figura 4.6: *Esempi di marcatori*

Le dimensioni sono standard, con diametri ad esempio di 1.5 mm o 3 mm, e consentono al software di conoscere l'orientazione del pezzo, rispetto ad una scansione precedente, se almeno tre di questi sono contenuti nel volume di misura, così da poter orientare il piano da essi formato.

Per una scansione ottimale c'è da fare particolare attenzione alla qualità superficiale dell'oggetto, che dev'essere priva di sporco, non riflettente né semitrasparente:

esiste uno specifico spray a base di polvere bianca che, se applicato opportunamente, opacizza la superficie permettendo una scansione corretta.

Le scansioni, inevitabilmente, includono punti che non appartengono alla superficie dell'oggetto, ma, ad esempio, alla struttura di sostegno dello stesso, alla piattaforma rotante o alla gabbia. L'eliminazione di tali punti può essere gestita manualmente mediante il software dedicato o automaticamente tramite passaggi pre impostati. La fase successiva è svolta esclusivamente dal calcolatore e consente di costruire una superficie a partire dai punti acquisiti dalle scansioni; mediante un processo di poligonalizzazione si genera una superficie costituita da triangoli adiacenti ottenuti mediando le coordinate dei punti dopo averli filtrati secondo un metodo di plausibilità: ombre e riflessi, che si presentano essendo questo un metodo ottico, sono spesso riconosciuti ed eliminati.

La fase di analisi dei risultati è gestita da un altro ambiente presente nel software stesso, di cui saranno descritte le funzionalità in seguito. Il principio è quello di sovrapporre ed allineare la superficie appena creata con quella del modello matematico a disegno, per poi confrontarne dimensioni, quote, forma e orientazione.

Capitolo 5

Introduzione di uno strumento di misura

La fase conclusiva del progetto di tesi consiste nella messa in opera di uno strumento di misura al fine di integrare o sostituire quelli già esistenti per gestire volumi crescenti di componenti prodotti.

I sistemi in uso sono del tipo "a contatto", come quelli descritti nel capitolo precedente, e un sistema ottico a laser; a questi si vuole affiancare un sistema di misura ottico a luce strutturata che possa elaborare le misure di alcuni pezzi ottimizzando in particolare le tempistiche. Per certi componenti di turbine, soprattutto pale rotoriche e statoriche, è necessario rilevare con la CMM una moltitudine di punti e linee che, inevitabilmente, ne allunga i tempi di misurazione. La messa in opera del nuovo sistema di misura ha richiesto diverse fasi consecutive:

- assemblaggio e collocazione del sistema
- apprendimento del principio di funzionamento e delle modalità di acquisizione
- scansione di specifici componenti e comparazione dei tempi
- apprendimento dello strumento di analisi
- elaborazione e comparazione dei risultati
- valutazioni conclusive



Figura 5.1: *Macchina in uso*

Il sistema ottico utilizzato è costituito da uno scanner 3D Triple Scan della GOM® (figura 5.1) su un braccio a movimentazione manuale, una tavola rotante e un computer con interfaccia uomo-macchina. Entrambe le fasi di apprendimento sono state gestite interamente da un esperto dello stabilimento GOM® mediante quattro corsi da 8 ore, durante le quali ho affiancato un operatore impiegato per l'uso della macchina stessa e del software dedicato. Per le restati tre ho operato in autonomia o supportato dagli addetti al reparto dimensionale, tra cui un ingegnere, due tecnici e un operatore.

5.1 Scansione e poligonalizzazione

Imparare ad utilizzare la macchina e a gestire i dati è il primo passo per utilizzare al meglio le potenzialità della macchina.



Figura 5.2: *Tavola per la calibrazione*

Dopo aver scelto le lenti adatte, accoppiate con il giusto proiettore, in base alle dimensioni del pezzo e ai suoi dettagli, si calibra la macchina con una tavola bianca (figura 5.2) su cui si distinguono dei cerchi scuri distribuiti secondo uno schema noto; la calibrazione è guidata e consiste nell'inquadrare la tavola a distanze e inclinazioni specificate dal software, che consente al sistema di rendere operativa la configurazione del sensore.

5.1.1 Gabbia e marcatori

Uno strumento utile, a volte indispensabile, consiste in una gabbia sui cui componenti (piano, aste verticali e orizzontali) si cospargono in maniera più o meno casuale una serie di marcatori.



Figura 5.3: *Gabbia cosparsa di marcatori*

Come funzione aggiuntiva è possibile, ma non essenziale, registrare la configurazione che la gabbia assume dopo l'applicazione dei marcatori, così da renderla completamente riconoscibile al sistema per ogni scansione.

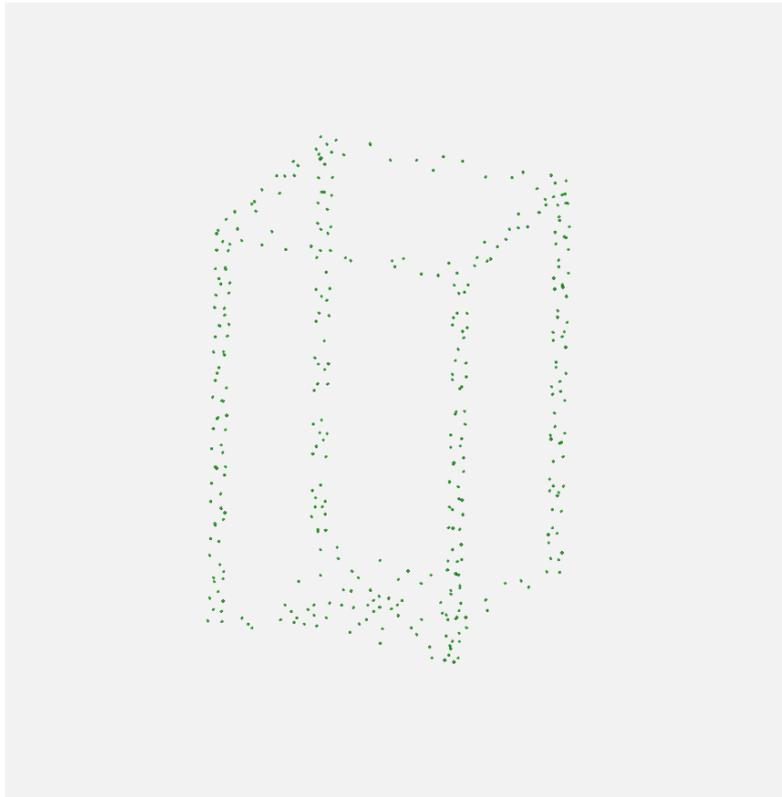


Figura 5.4: *Marcatori registrati sul software*

La registrazione dei marcatori come punti di riferimento avviene, durante una normale scansione, se essi rientrano nel volume di misura del sensore, se sono ben visibili, con un buon contrasto, da entrambe le camere e se nella stessa scansione compaiono almeno tre marcatori già noti; ciò perché, rispetto ad essi, è possibile dare le coordinate di quelli nuovi, fatta eccezione per la prima scansione, poiché rispetto a quelli registrati per primi si genera il sistema di riferimento che chiameremo *sistema di riferimento scansione*. Conoscere la posizione dei marcatori, nonché le distanze tra l'uno e l'altro, permette al sistema di capire da quale direzione e distanza si sta inquadrando l'oggetto. L'utilizzo della gabbia fornisce un vantaggio proprio sulla terza condizione: si effettua una scansione sulla gabbia per registrare la posizione di tutti i marcatori e renderli noti fin dall'inizio per ogni serie di misura, rendendo non più necessaria la condizione di dover inquadrare almeno tre marcatori già presenti in una delle scansioni precedenti. La disposizione adottata evita che ci siano ambiguità tra marcatori: ad esempio, applicando 3 marcatori secondo i vertici di un triangolo equilatero, il sensore sarebbe in grado di generare un piano per orientarsi, ma se si ricostruisse la stessa identica configurazione (con una tolleranza inferiore a quella del sensore stesso) su un altro lato dell'oggetto, il sensore, che valuta la disposizione relativa dei marcatori per identificarli, non saprebbe distinguerli gli uni dagli altri; sebbene tale eventualità sia improbabile, la scelta della disposizione ben distribuita

la rende quasi impossibile.

5.1.2 Acquisizione della superficie

Per le scansioni di oggetti più o meno complessi si possono distinguere due casi: scansione con un'unica posizione dell'oggetto e scansione con due o più posizioni. Il pezzo è posto nel centro della gabbia, poggiato, generalmente, su un lato piano, il quale non potrà essere acquisito, oppure in posizione sopraelevata, ma tenuta in posizione da un opportuno serraggio; esso crea delle zone d'ombra (non raggiungibili dalla luce del proiettore o dalle camere) la cui superficie non può essere acquisita durante una scansione. Se la zona mancante non è necessaria al fine della valutazione, è possibile effettuare la scansione con una sola posizione del pezzo, mentre, se è necessario avere tutte le superfici, bisogna effettuare una seconda serie di misure con una posizione diversa del pezzo. In questo caso è necessario applicare sul pezzo un minimo di 3 marcatori in una posizione tale da poter essere visti e acquisiti nelle diverse posizioni del pezzo, poiché sono necessari per allineare le diverse scansioni.

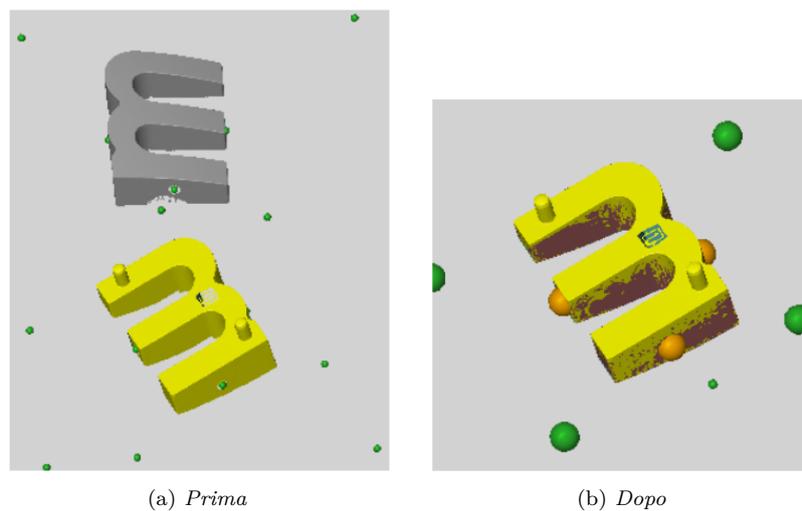


Figura 5.5: Operazione di allineamento di due diverse serie di scansioni

La scansione è un'operazione che avviene in qualche decina di millisecondi o in pochi secondi, in base al tempo di esposizione impostato: l'acquisizione avviene mediante registrazione da parte delle videocamere di diversi frame, impressi sul sensore delle camere in base all'apertura dell'otturatore; un oggetto chiaro o piuttosto riflettente richiede un tempo di esposizione breve, poiché restituisce al sensore gran parte della luce emessa dal proiettore, mentre per oggetti più opachi o scuri è preferibile usare un tempo di esposizione più lungo. La qualità della scansione dipende fortemente dal tempo impostato, poiché un'immagine poco illuminata restituisce poche informazioni, mentre una troppo luminosa non fornisce

il dovuto contrasto tra le frange proiettate, quindi non permette l'acquisizione di alcun punto. Si possono impostare fino a tre diversi tempi di esposizione per scansione, così da poter acquisire un maggior numero di punti laddove il pezzo presenti sia zone molto luminose che scure (è il caso di superfici piane frontali, luminosa, e la cavità tra due pale consecutive in una pala statorica, scura). Il software ATOS permette di visualizzare l'immagine visibile alle camere e segna in colore rosso le zone in sovrapposizione, come supporto per l'impostazione del giusto tempo di esposizione; inoltre il sensore proietta sul pezzo una croce in contrasto con la luce blu, utile sia nel centraggio del pezzo che nella valutazione del giusto contrasto tra croce e zona illuminata dal proiettore; in più due laser puntano nella stessa direzione delle camere, quindi con un certo angolo, così da poter individuare facilmente il fuoco ed avere un'idea della posizione del volume di misura, sebbene questo sia già visibile sul monitor. La scansione si effettua mediante un opportuno pulsante oppure attivando la rotazione automatica della tavola, impostando l'angolo totale e il numero di scansioni.

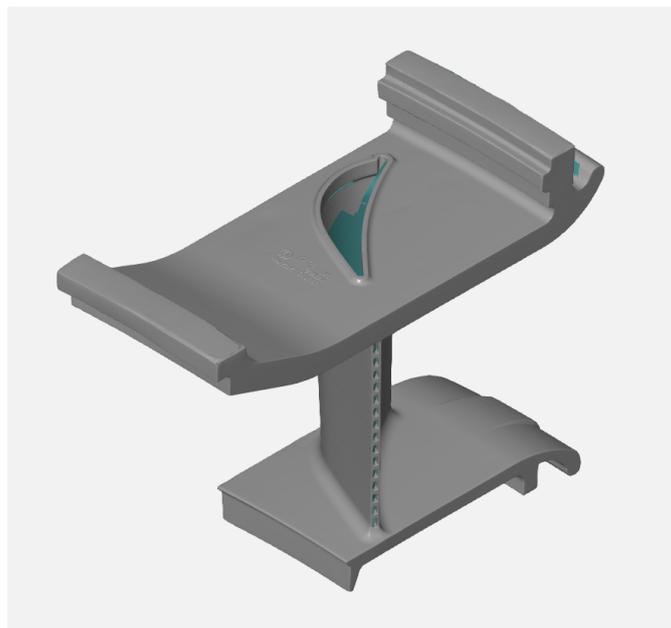


Figura 5.6: *Anteprima di una scansione completa*

Ogni scansione viene visualizzata sul monitor come un'anteprima della superficie scansionata, di cui è riportato un esempio in figura 5.6, in base alla qualità dei punti ottenuti; le scansioni sono valutate in base alla qualità dell'allineamento, espresso in pixel, che dipende specialmente dal numero di marcatori utilizzati e alla loro dispersione dello spazio: 3 marcatori disallineati forniscono un'informazione ben diversa da 3 marcatori allineati, per i quali può essere difficile o impossibile definire un piano; pochi marcatori distribuiti su diversi piani danno maggior precisione

nella determinazione dell'orientazione rispetto a più marcatori applicati sullo stesso piano.

5.1.3 Creazione e modifiche della superficie

Dopo aver ripulito la scansione dai punti esterni al pezzo, il software elabora la mole di dati acquisiti per generare una superficie: ogni scansione ha la dimensione di diversi GB sul drive, a seconda dell'ingombro del pezzo e della densità dei punti stessi. Il sistema di filtro dei punti già accennato permette di ottenere un modello matematico con una superficie pulita da qualsiasi "errore ottico". La funzione di poligonalizzazione crea una serie di triangoli adiacenti ottenuti mediando i punti acquisiti così da simulare una superficie continua. La dimensione degli elementi triangolari è gestita dal software stesso in base alla curvatura locale e alle dimensioni dell'intera superficie.

Nel programma stesso esiste un ambiente che permette di modificare la mesh: è possibile alleggerire la mesh laddove il numero di triangoli ottenuti è in numero eccessivo rispetto al livello di dettaglio richiesto, come può essere una superficie piana; si può levigare la mesh ottenuta se la superficie presenta una qualità a "buccia d'arancia"; dove, invece, ci sono raggi di raccordo o spigoli poco definiti, si può usare un comando di rifinitura, che aumenta il numero di triangoli dove necessario; un altro comando permette di riparare la mesh in presenza di discontinuità non presenti effettivamente sul pezzo, come, ad esempio, un granello di polvere o sabbia; infine, lo strumento più utile, si utilizza per chiudere fori o costruire piccole superfici mancanti, in base alla forma della zona circostante. Proprio quest'ultimo è utile per ricostruire i piani su cui si sono utilizzati i serraggi, anche se può risultare spesso un'operazione superflua.

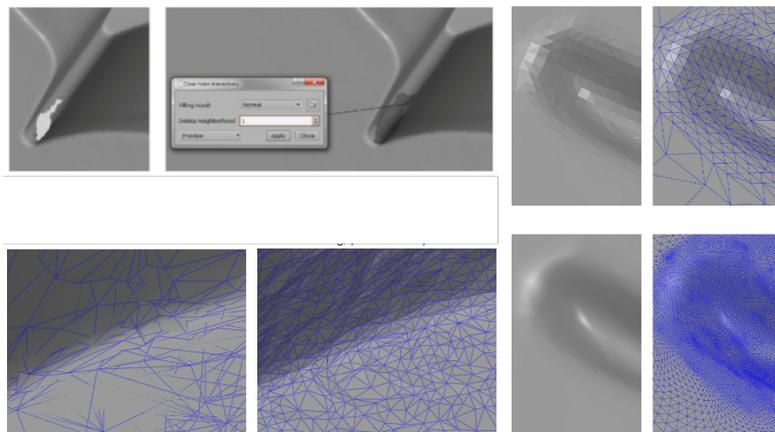


Figura 5.7: Esempi di possibili modifiche alla mesh

5.1.4 Ottimizzazione dei tempi di misura

Per lo studio sulle tempistiche si è deciso di scansionare proprio alcuni dei pezzi per cui si desidera utilizzare la scansione ottica piuttosto che la CMM. Il lavoro di ottimizzazione del tempo complessivo di consegna dei pezzi è un tema centrale nelle aziende come la Deloro. La fase finale di misura e convalida impiega un tempo variabile a seconda del tipo di pezzo, ma è influenzato anche dalla velocità della macchina di misura impiegata. I pezzi selezionati sono 5 pale statoriche di diversa dimensione e con diverse caratteristiche geometriche, così da focalizzare l'attenzione sull'utilizzo dello scanner 3D con componenti di turbine.

La prima fase del lavoro mi ha visto impegnato a prendere confidenza sia con il sistema di scansione che con le pale di turbina. Si inizia posizionando la pala sulla tavola rotante, nel centro della gabbia, nella posizione migliore a permettere la scansione completa delle superfici di controllo: ad ogni pezzo è allegato un disegno tecnico su cui si leggono tutte le informazioni dimensionali utili a chi programma la macchina di controllo.

Il passo successivo è impostare correttamente i parametri di scansione che influenzano da una parte la qualità della scansione, dall'altra il tempo impiegato per l'acquisizione, tra cui ritroviamo:

- tempo di esposizione per la misura e per i punti di riferimento: i due sono differenziati proprio perché si presentano quasi sempre con valori di luminosità diversi;
- numero di tempi di esposizione: si sceglie un valore intero compreso tra 1 e 3, dove il primo tempo di esposizione corrisponde a quello impostato manualmente, mentre i successivi sono il triplo del precedente, oppure si inseriscono dei valori personalizzati;
- qualità della scansione: permette di attivare, disattivare o personalizzare il filtro dei punti acquisiti che consente di escludere punti meno precisi o poco plausibili, che potrebbero essere stati acquisiti a causa di un riflesso o di un'ombra, oppure da una sola delle due camere;
- risoluzione della scansione: del tutto simile alla risoluzione delle fotocamere, imposta il numero di punti per pollice, noto nel campo fotografico col termine dpi;
- rilevamento di riflessi: è una particolare funzione, dispendiosa dal punto di vista della tempistica, che permette di rilevare la presenza di superfici

riflettenti proiettando le frange per porzioni di superficie, così da evitare di acquisire anche eventuali riflessi.

Non esiste un set di parametri standard da utilizzare, ma una combinazione adatta ad ogni situazione. Il livello di dettaglio che si vuole dare all'analisi dimensionale di pezzi di turbina, con le tolleranze che gli competono, ci portano a scegliere un tempo di esposizione il più breve possibile con l'attivazione di 2 diversi tempi di misura, la risoluzione massima e la disattivazione del rilevamento di riflessi; quasi sempre si sceglie una qualità elevata della scansione, sia perché è gestita dal calcolatore e non dal sensore, quindi non influenza il tempo di acquisizione, sia perché il risultato sarà sicuramente più pulito, ma ci sono casi in cui non escludere alcuni punti può essere utile.

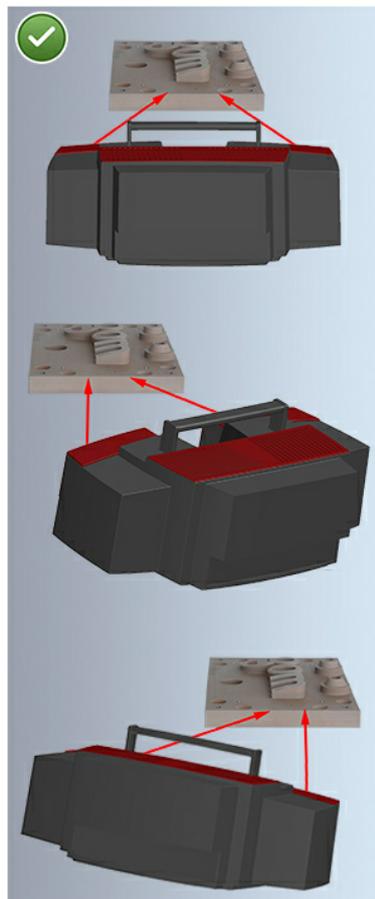


Figura 5.8: *Esempi di inquadratura da diverse angolazioni*

Quando la pala è in posizione e il sensore impostato, si individuano le posizioni migliori da far assumere al sensore per acquisire tutti i dettagli del pezzo: le scansioni dall'alto e dal basso consentono di vedere le superfici piane degli shroud (presenti alle due estremità della pala); le inquadrature frontali sono poco utilizzate a meno

di particolari cavità; alcuni bordi a spigolo vivo o con un piccolo angolo di raccordo spesso non sono acquisiti, ma risulta necessaria l'acquisizione dell'intero bordo d'uscita dei profili della pala che, se molto sottili, potrebbero sfuggire alle camere quando le frange vengono proiettate parallelamente ad esso. La distanza del sensore dal pezzo è ottimale quando nel volume di misura rientra sia il pezzo che i marcatori ed è possibile individuare il piano di fuoco in corrispondenza del punto in cui i fasci laser si intersecano (si visualizza avvicinando o allontanando lo scanner, oppure visualizzandolo dal monitor). Scopo dello studio preliminare è quello di trovare il numero minimo di posizioni sufficienti, così da limitare l'intervento dell'operatore sulla movimentazione dello scanner, poiché risulta essere un tempo lungo e variabile a seconda della manualità ed esperienza dello stesso.

L'ultima impostazione da ottimizzare è il numero di scansioni necessarie ad acquisire l'intera superficie, scelto impostando l'angolo di rotazione totale della tavola e il numero effettivo di scansioni desiderate, così che la tavola, sincronizzata automaticamente col sensore, ruoti con un passo costante tra una scansione e la successiva.

La fase di pulizia e poligonizzazione viene svolta in contemporanea all'acquisizione del pezzo successivo grazie alla possibilità di ATOS di gestire più progetti alla volta. Tali operazioni possono essere automatizzate con un'opportuna programmazione dell'ambiente dedicato nel software ed è da inserire in possibili sviluppi futuri. Tra questi rientrano l'acquisto e l'integrazione di una cella automatica, dotata di un braccio robotico, con cui è possibile orientare lo scanner e diminuire il numero totale di scansioni eliminando eventuali ridondanze inevitabili con il metodo applicato al momento.

5.1.5 Raccolta dati

Dopo aver individuato i corretti parametri e le opportune posizioni, ho scansionato 10 pezzi per ognuno dei 5 tipi di pale selezionate per ottenere un tempo operativo medio, ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 5.1: Tempo medio per pezzo con scansione manuale

Tempi scansione manuale	
n° conchiglia	tempo (min)
410605	25
410606	20
410440	15
410552	15
410549	14

Questi tempi sono stati confrontati con quelli necessari al sistema CMM per effettuare le stesse misurazioni, riassunti nella seguente tabella:

Tabella 5.2: Tempo per pezzo con misura alla CMM

Tempi scansione manuale	
n° conchiglia	tempo (min)
410605	22
410606	20
410440	22
410552	22
410549	16

Per individuare le reali potenzialità del sistema GOM® e giustificare un investimento per l'acquisto di una cella robotizzata, gli stessi pezzi sono stati misurati da terzi con un sistema completamente automatizzato e i tempi ottenuti sono di gran lunga minori rispetto a quelli elencati nelle tabelle precedenti. Volendo riassumere i dati acquisiti per un confronto finale, il sistema ottico, nella configurazione attuale, permette un risparmio di tempo per i 3 componenti statorici della Sulzer®, mentre, per quelli della GE®, non si registra una convenienza significativa. In possesso di una cella robotizzata, invece, i tempi si riducono sensibilmente.

Tabella 5.3: Confronto tempi di misura

n° conchiglia	Tempi misura		
	CMM	tempo [min]	
		ATOS®	ATOS®+cella
410605	22	25	4
410606	20	25	5
410440	22	15	4
410552	22	15	6
410549	16	14	3



Figura 5.9: Sistemi di misura usati per la raccolta dei tempi

5.2 Strumento di analisi

Un altro ambiente del software ATOS permette di gestire una sequenza di operazioni sulle mesh elaborate per poterne analizzare le proprietà geometriche e dimensionali. La seconda parte del mio lavoro in azienda mi ha visto impegnato nell'imparare ad utilizzare i comandi e le funzioni principali di tale ambiente per poter estrapolare dalle scansioni effettuate le informazioni necessarie a convalidare il sistema ottico GOM® all'interno della produzione. In particolare sono stati effettuati due studi principali sulle misurazioni ottenute: verifica sulla dispersione dei dati e confronto con le misure del sistema a contatto. Dimostrare che le misure ottenute siano equivalenti, affidabili e ripetibili è un passo necessario per inserire la scansione 3D nel processo di produzione.

5.2.1 Analisi

Punto di partenza per l'analisi dimensionale è la lettura del disegno tecnico allegato all'ordine del pezzo, che è spesso accompagnato da un relativo modello matematico CAD. Sul disegno si leggono le quote dei punti (o piani) per l'allineamento, le quote dei punti di controllo, i piani di sezione per lo studio dei profili alari della pala e le rispettive proprietà geometriche da verificare, tutto con le proprie tolleranze.

L'ambiente Analisi permette di importare dall'esterno il modello CAD, nominale, su cui costruire le geometrie da misurare, sovrapponendo ad esso la mesh ricavata dalla scansione e ricavando le stesse geometrie, mediante un opportuno metodo, sulla superficie cosiddetta effettiva. Si procede specificando le misure da prendere in esame, con le dovute tolleranze, che saranno confrontate dal software con quelle nominali. L'utilizzo dei colori facilita la lettura dei risultati e permette la costruzione di una superficie a colori su tutto il pezzo, mediante una funzione di confronto.

Allineamento

Il CAD nominale importato ha un proprio sistema di riferimento che non coincide con quello generato dalla scansione, perciò le due superfici si trovano, inizialmente, in posizioni completamente disgiunte. La prima operazione consiste nell'allineare la mesh, trovando la configurazione che più si adatta a quella nominale. Questo allineamento dipende dalla deformazione complessiva del pezzo ed è ottenuto minimizzando l'errore medio. A partire da questa posizione si intercettano sull'effettivo i punti necessari per l'allineamento definitivo, detto RPS (Reference Point System): a disegno sono specificati i punti necessari all'allineamento e la loro posizione è dettata dal progettista, ma spesso si trovano in punti di tangenza sul profilo della

pala, o sul dorso o su uno dei due bordi, d'attacco o d'uscita, altri su superfici piane degli shroud; 6 punti sono necessari a bloccare i 6 gradi di libertà di un generico corpo rigido, in cui ogni punto fissa una direzione, scelta parallelamente alla normale del punto sulla superficie del pezzo; 3 di questi bloccano i 3 gradi di libertà traslazionali, generando un piano, mentre gli altri 3 bloccano le 3 rotazioni attorno ai rispettivi assi, ottenendo, così, una posizione univoca dell'effettivo rispetto al nominale, facendo corrispondere una o più componenti delle coordinate dei singoli punti.

I punti per l'allineamento si inseriscono manualmente mediante coordinate, a cui va aggiunta l'orientazione della normale alla superficie in quel punto, ottenendo un cosiddetto *punto su superficie*. L'informazione aggiuntiva della normale permette sia l'allineamento che l'individuazione del punto stesso sulla mesh effettiva.

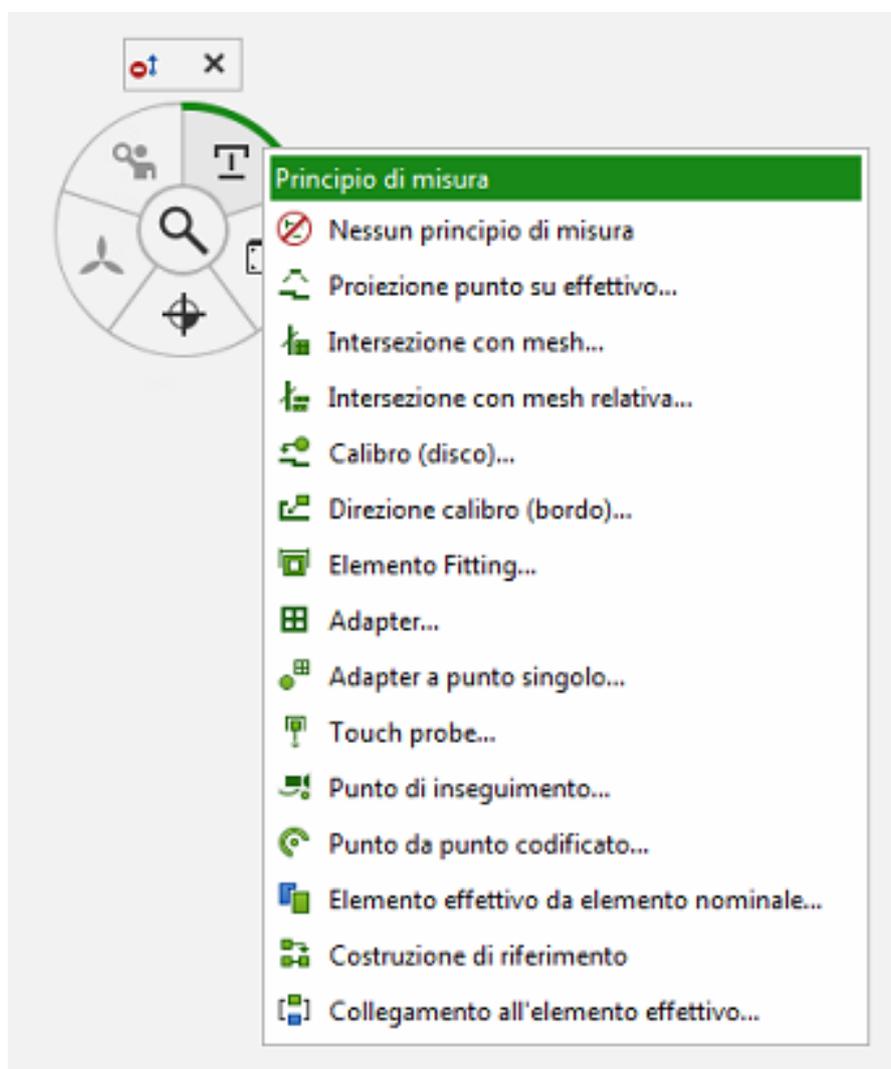


Figura 5.10: Esempi di principi di misura applicabili ad un elemento nominale per la ricerca del relativo effettivo

A ogni elemento creato sul nominale va attribuito un principio di misura che indica al software la modalità con cui deve cercare quell'elemento sulla mesh: ad esempio un punto può essere intercettato sulla mesh come intersezione di una retta passante per il punto nominale, nella direzione della sua normale, oppure utilizzando una superficie di contatto (calibro) per ottenere un punto di tangenza rispetto al piano individuato dalla normale. A volte un principio di misura può risultare equivalente ad un altro, ma spesso esso dev'essere selezionato proprio in base alla particolare posizione del punto o alla sua funzione.

Punti, curve e superfici

Il piano di controllo dimensionale di un pezzo include la verifica di coordinate, o componenti, di punti, forma e proprietà di sezioni della pala, scostamenti minimi e massimi di superfici.

I punti di controllo si definiscono allo stesso modo dei punti per l'allineamento RPS, quindi specificando la modalità di ricerca di questi sull'effettivo, ma va aggiunta la quantità da misurare e confrontare, attribuendo la dovuta tolleranza. Oltre al confronto delle tre coordinate, separatamente, è possibile valutare l'effettiva distanza che separa i punti dai rispettivi effettivi.

Le curve possono essere create in diversi modi o definiti come geometrie note, come cerchi o poligoni; uno strumento che permette l'analisi dei profili della pala è la sezione per un piano: genera il profilo di intersezione tra la superficie della pala e della sezione e, sull'effettivo, è possibile ottenere una sezione usando lo stesso piano, oppure proiettando la sezione nominale sulla superficie dell'effettivo; i due risultati possono differire tra di loro. Il software ATOS è dotato di uno strumento incentrato in particolar modo sullo studio dei profili alari che si attiva quando viene riconosciuta una curva chiusa. La prima funzione da attivare è la generazione della linea media, da cui è possibile ricavare tutte le proprietà geometriche del profilo: essa è definita come il luogo dei punti medi tra il dorso e il ventre del profilo; definendo la direzione del flusso è possibile distinguere il bordo d'attacco da quello di fuga, di cui è possibile determinare la circonferenza generatrice e lo spessore a una data distanza dall'estremità. La corda è tra i principali elementi di confronto e ne esistono di diversi tipi:

- corda nominale: è il segmento che ha per estremi il bordo d'attacco e il bordo di fuga
- corda bi tangenziale: definita una direzione, è il segmento che ha per estremi i due punti di intersezione tra il profilo e le due tangenti avente la direzione assegnata

- corda massima: è il segmento massimo inscritto nel profilo

Un'ulteriore funzione presente nello strumento per le sezioni è lo spessore massimo, definito per i profili alari come la misura del diametro della circonferenza massima inscritta nel profilo.

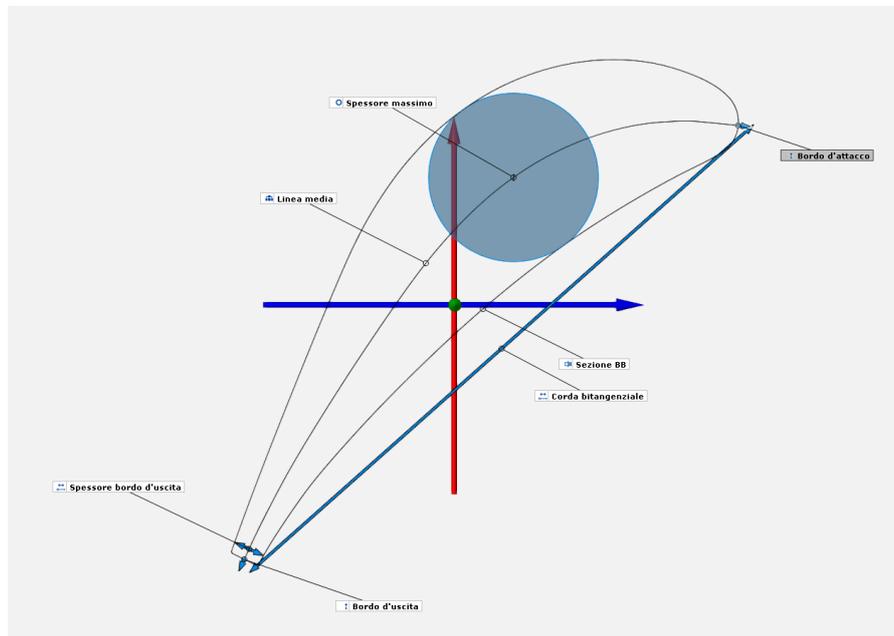


Figura 5.11: *Esempio di sezione di una pala con relativi elementi del profilo alare*

La forma e la deviazione complessiva del profilo dal nominale passa per la definizione della relativa funzione, da cui è possibile estrapolare la deviazione massima e minima, la rotazione della sezione rispetto ad un sistema di riferimento definito sul piano della sezione, avente come origine il cosiddetto stacking point: una pala di turbina è generata come sviluppo lungo una linea, detta stacking line, di un profilo alare che varia sia in dimensione che in orientazione, ruotando attorno a questa "linea di impilamento"; per ogni profilo, quindi, è possibile definire uno stacking point come punto di intersezione della stacking line con il piano di sezione del profilo stesso. Ognuno di questi elementi è automaticamente associato ad un principio di misura, spesso utilizzato per altri elementi, detto costruzione di riferimento: la definizione dell'elemento sull'effettivo è la stessa applicata sul nominale.

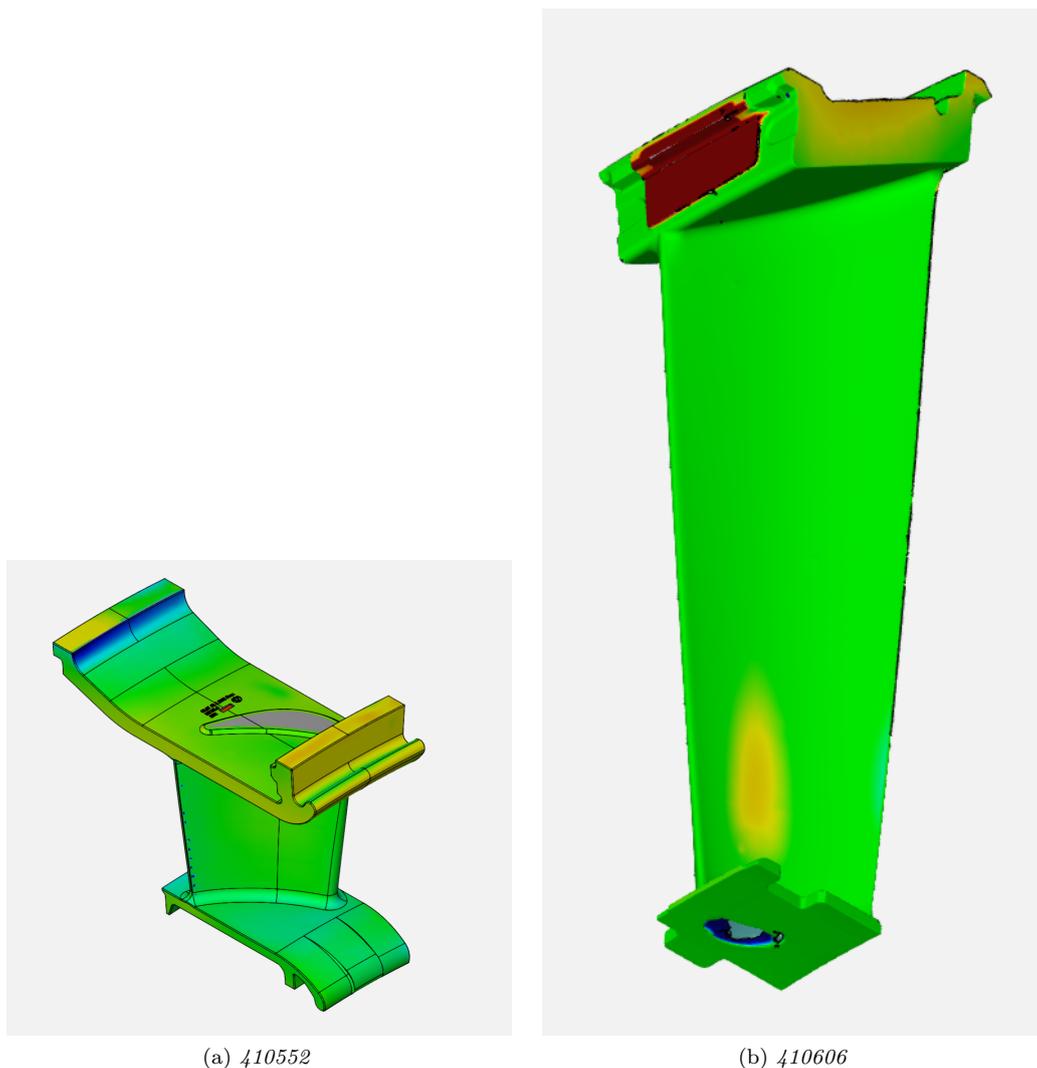


Figura 5.12: Esempi di confronto di superficie di due pale statoriche

Un ultimo confronto tra superfici genera una maschera a colori sul pezzo che permette di avere un'idea globale della deviazione dell'effettivo dal nominale. La mappa a colori va impostata secondo il grado di tolleranza accettabile, così da avere in verde le zone che rientrano nel range, in blu quelle al di sotto del minimo e in rosso quelle al di sopra del massimo, con le opportune sfumature di transizione, continua o discontinua, tra un colore e gli altri due. L'interpretazione passa per una serie di conoscenze pregresse sul processo e sugli strumenti utilizzati: una di queste considera le zone in rosso come zona di sovrametallo e in blu zone in cui manca metallo; una più attenta analisi può suggerire, in presenza di deviazioni contrastanti su due superfici opposte, di avere una zona deformata piuttosto che di spessore errato; la deformazione può essere presente sia nella zona segnata in rosso e blu, ma anche in zone in cui rientrano uno o più punti definiti per l'allineamento dell'RPS, poiché, un errore di posizione di uno di questi punti, sposta la deviazione

sul resto del pezzo, mentre, nel suo intorno, viene forzato a zero. Per correggere questo tipo di errore si hanno a disposizione diversi strumenti a seconda dell'entità e della frequenza dell'errore riscontrato: si può agire sul pezzo stesso, deformandolo a freddo per riportarlo nella giusta configurazione, ma è un'operazione da evitare o, spesso, non desiderata; se la deformazione si presenta su gran parte dei pezzi ottenuti, il problema va ricercato in una o più fasi precedenti, come l'errata tenuta del guscio ceramico, una deformazione non voluta o non controllata del pezzo in cera o una forma in conchiglia non adatta. Agire su uno di questi problemi ha un peso diverso, sia in termini economici che logistici, per cui si interviene su problemi con impatto crescente sul processo stesso.

Resoconto

Un terzo ambiente in ATOS fornisce gli strumenti per la realizzazione di un report in cui riassumere le viste di maggior interesse con opportuni appunti su dimensioni, quote e annotazioni, mentre, nella prima pagina, si riassumono le caratteristiche e nomenclature del pezzo analizzato. Impostate le pagine, esse possono essere aggiornate per ogni mesh importata nel programma, così da garantire un formato unico per quella determinata analisi.

5.3 Elaborazione e comparazione dei risultati

L'analisi di una scansione restituisce una tabella in cui sono riassunte le misure degli elementi generati in cui ritroviamo le relative misure nominali, quelle effettive, le deviazioni e l'eventuale ampiezza di scostamento dal range di tolleranza, di cui sono riportati gli estremi inferiore e superiore.

La fase di convalida comprende la raccolta delle misure di tutte le scansioni e il confronto dei risultati ottenuti dall'analisi dei pezzi con le rispettive misure fatte con la CMM, macchina attualmente usata per la misura dei pezzi in produzione. Tale lavoro parte dal rendere equivalenti le due modalità di misura, sebbene abbiano due modi di operare ben diversi. Con ingegneri esperti nell'utilizzo della CMM, ho analizzato la sequenza di misurazione della macchina: direzione di intercettazione dei punti, definizioni delle quote per le sezioni, numero e posizione di punti per il calcolo di eventuali minimi e massimi su superfici piane e definizione dei punti per l'RPS, da cui dipendono inevitabilmente le misure di tutti gli elementi. Un esempio che giustifica tale necessità è illustrato in figura 5.13 e mostra tre diverse misurazioni del raggio di una sezione circolare: una è ottenuta creando una circonferenza che meglio approssima la curva generata dal piano di sezione; la seconda è ricavata

mediante tre punti che giacciono sulla curva; la terza utilizza un principio di approssimazione mediante i minimi quadrati, sfruttando 6 punti.

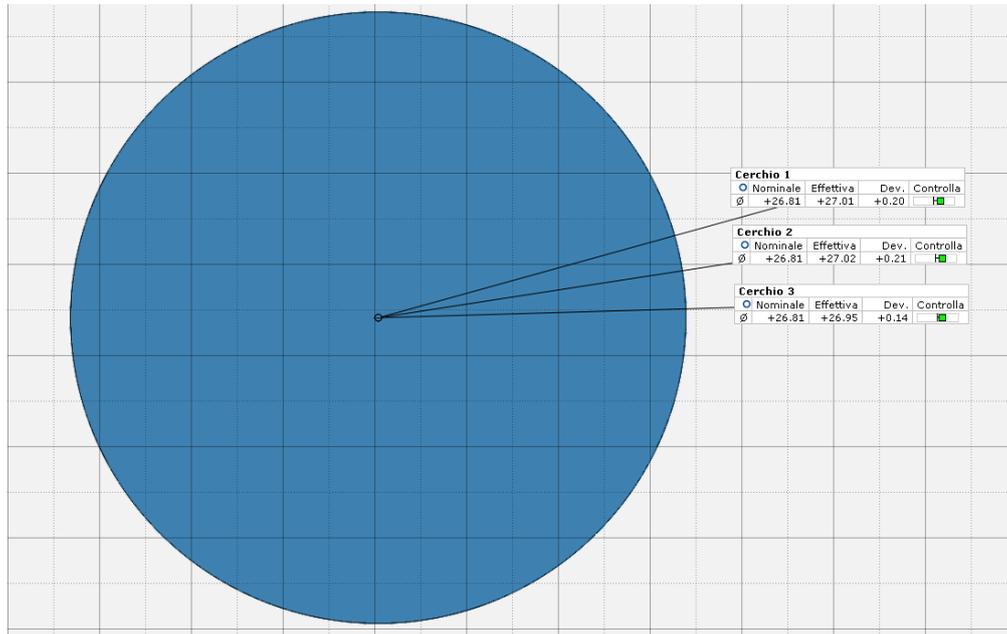


Figura 5.13: Esempio di calcolo del diametro di una circonferenza con 3 diversi metodi

I programmi di analisi per i 5 pezzi scansionati sono stati compilati in maniera equivalente ai rispettivi programmi della CMM e i risultati raccolti in tabelle. La prima valutazione consiste nel valutare la misura di ogni elemento ricavando il valore medio di 10 scansioni effettuate sullo stesso pezzo, così da garantirne affidabilità e ripetibilità. La seconda valutazione è stata fatta sullo scarto tra la misura media di ogni elemento e il rispettivo valore ottenuto dalla CMM al fine di garantire l'esattezza dei risultati e del metodo adottato.

5.3.1 Valutazione statistica

Dopo aver effettuato 10 scansioni per un pezzo selezionato, di ognuno dei 5 tipi di pale, ho raccolto in tabelle i risultati ottenuti e, poiché essi dipendono dalla variabilità delle scansioni, effettuate in modalità manuale e con piccole variazioni sia di posizionamento del pezzo che di orientazione del sensore, e non dal pezzo scelto, i risultati hanno una certa variabilità. Riporto a titolo di esempio i dati relativi ad uno di essi nelle tabelle 5.4 e 5.5.

Tabella 5.4: Raccolta delle posizioni dei primi 15 punti di controllo per 10 diverse scansioni del Sulzer 410440

RESOCONTO DIMENSIONALE QUOTE PUNTI															
Item	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)	P4 (mm)	P5 (mm)	P6 (mm)	P7 (mm)	P8 (mm)	P9 (mm)	P10* (mm)	P11* (mm)	P12 (mm)	P13 (mm)	P14 (mm)	P15 (mm)
Nominale	1133,23	1133,23	1191,99	1191,99	100,50	100,50	192,00	192,00	75,76	72,89	75,86	78,92	79,85	75,76	72,89
1	1132,84	1132,12	1191,87	1191,69	100,86	99,97	192,00	191,09	76,24	73,45	76,54	78,72	79,54	76,69	73,87
2	1132,80	1132,10	1191,84	1191,67	100,86	99,96	191,97	191,07	76,24	73,45	76,55	78,75	79,57	76,69	73,88
3	1132,85	1132,14	1191,88	1191,71	100,86	99,94	191,99	191,10	76,23	73,44	76,57	78,78	79,59	76,71	73,89
4	1132,87	1132,17	1191,91	1191,75	100,87	99,98	192,03	191,10	76,25	73,46	76,54	78,73	79,55	76,69	73,88
5	1132,86	1132,14	1191,86	1191,71	100,85	99,97	192,04	191,10	76,24	73,45	76,53	78,71	79,53	76,69	73,88
6	1132,91	1132,20	1191,94	1191,77	100,87	99,99	192,03	191,12	76,24	73,45	76,54	78,73	79,55	76,71	73,89
7	1132,90	1132,19	1191,93	1191,76	100,87	99,98	192,03	191,12	76,24	73,45	76,54	78,73	79,55	76,71	73,89
8	1132,90	1132,19	1191,93	1191,76	100,87	99,98	192,03	191,12	76,24	73,45	76,55	78,74	79,56	76,70	73,89
9	1132,90	1132,19	1191,92	1191,76	100,86	99,98	192,03	191,12	76,24	73,45	76,54	78,74	79,56	76,70	73,89
10	1132,90	1132,19	1191,93	1191,76	100,87	99,98	192,02	191,12	76,24	73,45	76,55	78,75	79,57	76,70	73,89
MEDIA	1132,87	1132,16	1191,90	1191,73	100,86	99,97	192,02	191,11	76,24	73,45	76,55	78,74	79,56	76,70	73,89
DEVIAZIONE	0,036	0,035	0,035	0,036	0,007	0,014	0,023	0,017	0,005	0,005	0,011	0,019	0,017	0,009	0,007

Tabella 5.5: Raccolta delle misure relative a 3 sezioni della pala del Sulzer 410440

Item	Err. forma min				Err. forma max				Rotazione (deg)				Spessore massimo (mm)				Spess. bordo d'uscita (mm)			
	BB	CC	DD	DD	BB	CC	DD	DD	BB	CC	DD	DD	BB	CC	DD	DD	BB	CC	DD	DD
Nominale	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	43,53	40,49	38,51	21,26	25,68	29,97	3,68	3,91	3,71	3,71	3,71	4,15
1	0,17	0,19	0,16	0,10	0,16	0,16	0,08	0,08	43,33	40,25	38,33	21,14	25,62	29,88	3,51	3,71	3,71	3,71	3,71	3,84
2	0,17	0,19	0,16	0,10	0,16	0,16	0,08	0,08	43,33	40,24	38,33	21,13	25,61	29,88	3,52	3,7	3,7	3,7	3,7	3,84
3	0,16	0,20	0,18	0,09	0,17	0,17	0,08	0,08	43,32	40,23	38,32	21,14	25,62	29,89	3,51	3,7	3,7	3,7	3,7	3,82
4	0,16	0,20	0,16	0,11	0,17	0,17	0,07	0,07	43,33	40,24	38,34	21,13	25,62	29,88	3,52	3,71	3,71	3,71	3,71	3,83
5	0,18	0,20	0,16	0,10	0,18	0,18	0,09	0,09	43,33	40,23	38,33	21,12	25,62	29,88	3,5	3,71	3,71	3,71	3,71	3,83
6	0,17	0,19	0,16	0,09	0,15	0,15	0,08	0,08	43,33	40,24	38,33	21,12	25,61	29,89	3,5	3,7	3,7	3,7	3,7	3,83
7	0,17	0,19	0,16	0,09	0,16	0,16	0,09	0,09	43,33	40,24	38,33	21,12	25,61	29,88	3,5	3,7	3,7	3,7	3,7	3,82
8	0,17	0,20	0,16	0,09	0,15	0,15	0,08	0,08	43,33	40,24	38,33	21,12	25,61	29,88	3,5	3,69	3,69	3,69	3,69	3,83
9	0,17	0,20	0,17	0,09	0,16	0,16	0,08	0,08	43,34	40,24	38,33	21,12	25,61	29,89	3,5	3,69	3,69	3,69	3,69	3,82
10	0,17	0,20	0,17	0,09	0,16	0,16	0,08	0,08	43,33	40,24	38,33	21,12	25,61	29,88	3,5	3,69	3,69	3,69	3,69	3,83
MEDIA	0,17	0,20	0,16	0,10	0,16	0,16	0,08	0,08	43,33	40,24	38,33	21,13	25,61	29,88	3,51	3,70	3,70	3,70	3,70	3,83
DEVIAZIONE	0,006	0,005	0,007	0,007	0,009	0,009	0,006	0,006	0,005	0,006	0,005	0,008	0,005	0,005	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,007

Alle misure di ogni elemento è possibile determinare i valori di media e deviazione standard per ricostruire una possibile distribuzione gaussiana per visualizzare un range di probabilità. Il calcolo della media è stato effettuato mediante una semplice media aritmetica, secondo la formula

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} \quad (5.1)$$

mentre per il calcolo della deviazione è stato necessario usare la formula della deviazione standard campionaria, poiché il numero delle prove eseguite non è sufficiente a rappresentare l'intera popolazione, o comunque non è abbastanza alto da rendere le due formule uguali.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{9}} \quad (5.2)$$

dove con x è intesa una qualsiasi quantità di quelle riportate nelle tabelle precedenti.

Queste due quantità permettono la costruzione della distribuzione gaussiana della densità di probabilità, detta anche *distribuzione normale*, espressa dalla formula

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.3)$$

che nel nostro caso, usando i due stimatori appena accennati per media e deviazione standard delle nostre misure, diventa:

$$f(x) = \frac{1}{s \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2s^2}} \quad (5.4)$$

Nelle figure 5.14 ho riportato alcuni esempi delle distribuzioni ottenute. Da ognuna di queste è possibile ricavare un intervallo la cui ampiezza è un indice della probabilità che la misura rientri entro quei limiti. La distribuzione normale non è limitata né a destra, né a sinistra, perciò ho rappresentato una partizione della funzione, troncadola nei valori ottenuti secondo il principio *Sei Sigma*, il quale restituisce l'intervallo relativo alla probabilità del 99,7% .

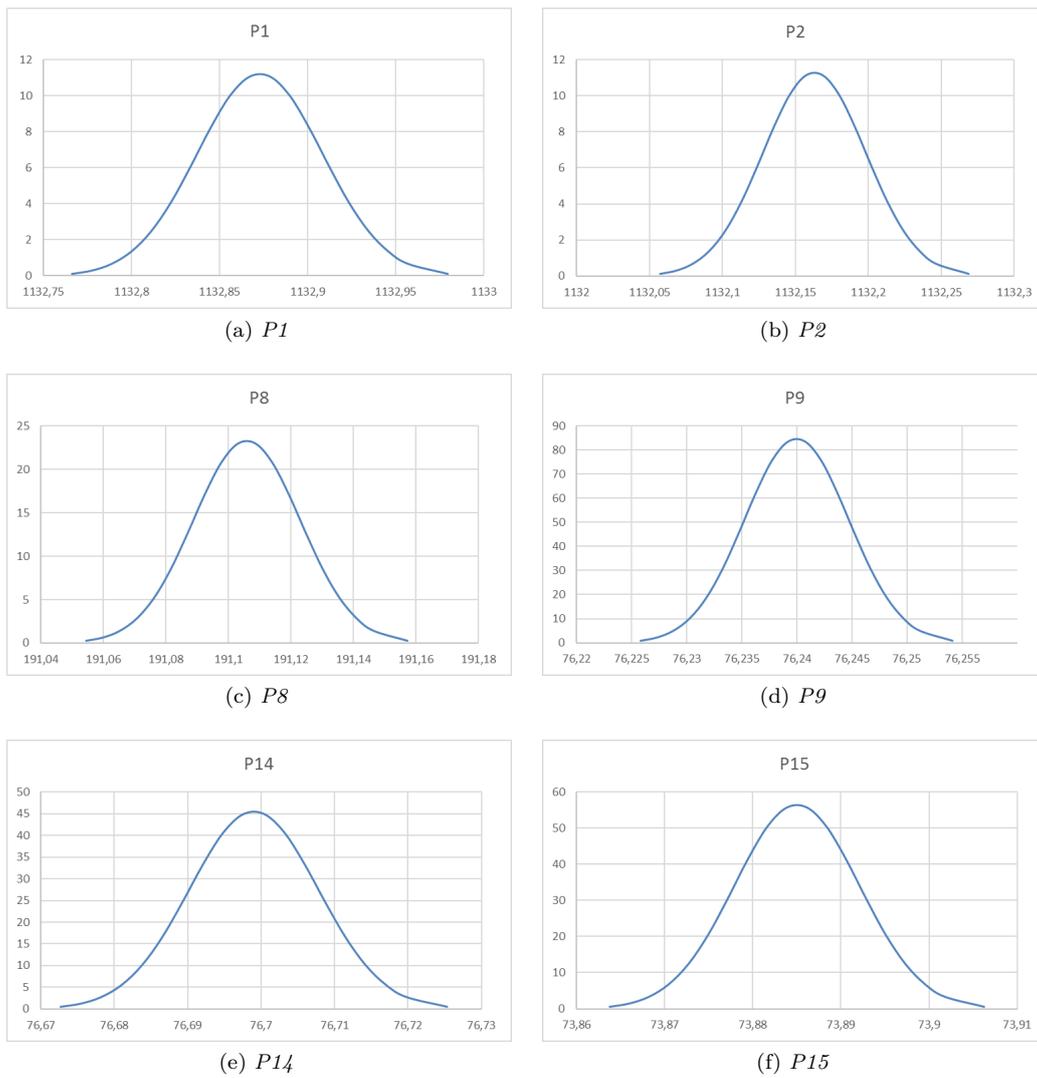


Figura 5.14: Distribuzione normale per 6 dei punti misurati

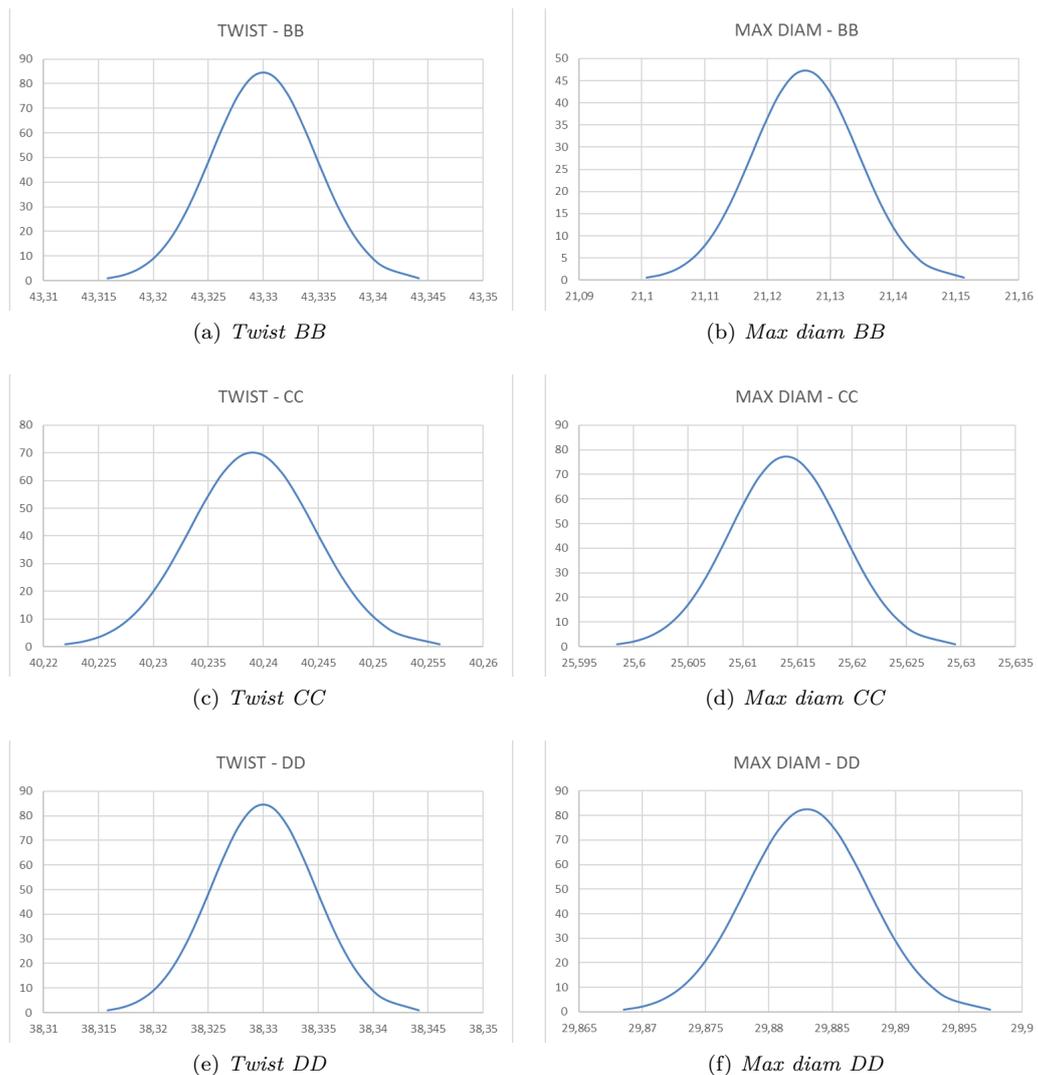


Figura 5.15: Distribuzione normale per 2 elementi misurati di 3 sezioni

5.3.2 Comparazione delle misure

Per dimostrare la correttezza delle misure dei pezzi tramite scansione e analisi è stato necessario comparare i risultati con quelli ottenuti dalla CMM. La presenza di discordanze ci ha permesso di individuare le differenze tra i due programmi utilizzati per elaborare le misure, così da poter adattare meglio quello creato in ATOS al programma impostato per la CMM. Rendere le due misure equivalenti è necessario per garantire la continuità e l'univocità della modalità di misura.

I differenti principi di funzionamento propri dei due sistemi di misura ha reso la fase di accostamento delle due misurazioni materia di studio di una parte del mio percorso. Ogni pezzo studiato è misurato con la CMM secondo modalità impostate in precedenza. La ricerca dei punti sull'effettivo avviene mediante avvicinamento del tastatore secondo una traiettoria, quindi è utile far corrispondere lo stesso modo

di ricerca anche nel programma ATOS. Particolare attenzione è stata posta alle misure derivate, cioè a quelle calcolate a partire dalle misure ottenute: distanze tra punti, curve o superfici, caratteristiche geometriche del profilo alare della pala.

La tipica distanza tra punti utile nell'analisi di una pala statorica è il passo tra una pala e l'altra, quando il pezzo contiene più di una pala. Esso è definito come distanza assoluta tra i bordi d'uscita di sezioni corrispondenti. Tale calcolo, nella CMM è gestita da un software dedicato, che analizza i profili a partire dall'acquisizione tramite tastatore della curva del profilo. Una tipica distanza tra curva indicata nel progetto è la larghezza di gola, cioè la minima distanza tra due profili consecutivi, ma essa va spesso calcolata sullo stesso piano della sezione. Le differenze possono sembrare minime, ma spesso portano a una discordanza non trascurabile tra le due diverse misure.

A titolo di esempio si riportano nelle tabelle 5.6 e 5.7 i valori ottenuti dalle due diverse misure per un singolo componente: Sulzer 410440 (figura 5.16).

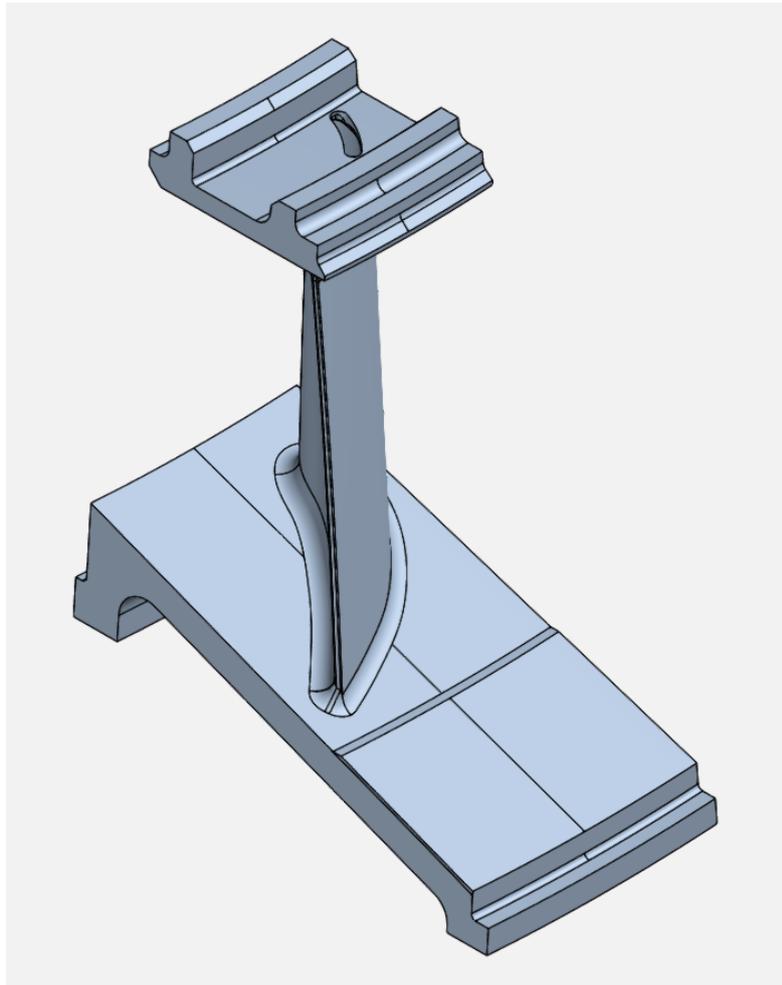


Figura 5.16: *Vista isometrica del CAD della pala statorica in esame*

Tabella 5.6: a) Riepilogo confronto CMM - ATOS per Sulzer 410440

P POINTS DIMENSIONAL REPORT										
Item	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)	P4 (mm)	P5 (mm)	P6 (mm)	P7 (mm)	P8 (mm)	P9 (mm)	P10* (mm)
Nominale	1133.23	1133.23	1191.99	1191.99	100.50	100.50	192.00	192.00	75.76	72.89
CMM	1132.776	1132.120	1192.055	1191.899	100.963	99.965	191.919	191.123	76.223	73.412
ATOS	1132.873	1132.163	1191.901	1191.734	100.864	99.973	192.017	191.106	76.240	73.450
SCARTO	0.097	0.043	-0.154	-0.165	-0.099	0.008	0.098	-0.017	0.017	0.038
Item	P11* (mm)	P12 (mm)	P13 (mm)	P14 (mm)	P15 (mm)	P16 (mm)	P17 (mm)	P18 (mm)	P19 (mm)	P20 (X) (mm)
Nominale	75.86	78.92	79.85	75.76	72.89	75.86	78.92	79.85	858.43	36.50
CMM	76.643	78.969	79.806	76.768	73.959	76.419	80.268	81.393	859.352	36.396
ATOS	76.625	78.838	79.757	76.699	73.885	76.483	80.318	81.339	859.421	36.476
SCARTO	-0.018	-0.131	-0.049	-0.069	-0.074	0.064	0.050	-0.054	0.069	0.080
Item	P20 (Y) (mm)	P21 (mm)	P22 (mm)	P23 (mm)	P24 (mm)	P25* (mm)	P26* (mm)	P27 (mm)	P28 (mm)	P29 (X) (mm)
Nominale	40.18	66.00	66.00	57.00	57.00	58.22	58.22	58.22	58.22	35.42
CMM	40.477	66.366	65.643	57.006	57.545	58.434	58.633	59.154	59.053	35.047
ATOS	40.253	66.537	65.895	56.808	57.252	58.518	58.629	59.049	59.024	35.142
SCARTO	-0.224	0.171	0.252	-0.198	-0.293	0.084	-0.004	-0.105	-0.029	0.095

Tabella 5.7: b) Riepilogo confronto CMM - ATOS per Sulzer 410440

Item	P29 (Y)	P30	P31	P32	P33	P34	P35	P36	P37
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Nominale	36.50	1066.64	1066.64	1112.19	1108.55	1130.15	1130.15	1156.93	1156.93
CMM	36.927	1066.622	1065.439	1112.301	1108.097	1130.309	1130.079	1157.425	1157.245
ATOS	36.847	1066.725	1065.390	1112.300	1108.041	1130.249	1130.014	1157.319	1157.164
SCARTO	-0.080	0.103	-0.049	-0.001	-0.056	-0.060	-0.065	-0.106	-0.081
AIRFOIL PARAMETERS DIMENSIONAL REPORT									
Item	Err. forma min			Err. forma max			Rotazione		
		(deg)	(deg)		(deg)	(deg)		(deg)	(deg)
Sezione	BB	CC	DD	BB	CC	DD	BB	CC	DD
Nominale	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	43.53	40.49	38.51
CMM	0.163	0.192	0.185	0.104	0.160	0.076	43.294	40.198	38.299
ATOS	0.169	0.196	0.164	0.095	0.162	0.081	43.330	40.239	38.330
SCARTO	0.006	0.004	-0.021	-0.009	0.002	0.005	0.036	0.041	0.031
AIRFOIL PARAMETERS DIMENSIONAL REPORT									
Sezione	Spessore massimo			Corda massima			Spess. bordo d'uscita		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Nominale	BB	CC	DD	BB	CC	DD	BB	CC	DD
	21.26	25.68	29.97	127.17	134.81	142.72	3.68	3.91	4.15
CMM	21.149	25.649	29.917	127.103	134.683	142.763	3.522	3.693	3.821
ATOS	21.126	25.614	29.883	127.130	134.660	142.770	3.506	3.700	3.829
SCARTO	-0.023	-0.035	-0.034	0.027	-0.023	0.007	-0.016	0.007	0.008

5.4 Conclusioni

Prendere confidenza con la nuova macchina di misura ci ha permesso di ottenere da questa degli ottimi risultati, in termini di scansioni, in tempi ragionevoli. Appuntare il tempo necessario ad effettuare tutte le scansioni è stato utile nel confronto con i tempi necessari per la stessa operazione effettuata con il sistema di misura a contatto. Il nostro intento era dimostrare la convenienza, per alcuni pezzi, dell'utilizzo del sistema di misura ottico, non solo per poter gestire un maggior numero di pezzi, ma anche da un punto di vista economico, poiché permette di ridurre il numero di turni necessari per misurare, complessivamente, un intero lotto. Il beneficio dello strumento ottico, mostrato dai tempi riportati nella tabella 5.1, ci ha convinti, ancor più, a provare lo stesso sistema con l'aggiunta dell'automazione. I tempi registrati mostrano una netta differenza tra i tempi necessari al sistema a contatto e quello ottico, come riportato in tabella 5.3. Con l'utilizzo di un sistema ottico abbinato ad un braccio robotizzato, si riesce ad avere un risparmio medio dell'88% circa, consentendo, volendo pensare ad un investimento in tale direzione, di ammortizzare il costo complessivo della macchina in breve tempo.

L'insieme dei dati raccolti ed elaborati hanno mostrato una piena compatibilità tra il sistema di misura a contatto e quello ottico, confermando l'affidabilità di quest'ultimo nella misurazione. Dalle tabelle 5.4 e 5.5 risultano dei valori misurati molto simili tra di loro nelle 10 diverse scansioni, con una variabilità contenuta entro lo 0.1%, come mostrato anche dai grafici nelle figure 5.14 e 5.15. I valori di deviazione standard ottenuti suggeriscono un intervallo di confidenza pienamente accettabile, la cui ampiezza non supera lo 0.05% della misura stessa e che comunque sia contenuto entro 0.1 mm. Tali risultati non fanno che confermare le caratteristiche dichiarate dal costruttore e ci rendono fiduciosi nell'utilizzo della macchina per misurare i componenti prodotti in azienda.

Partendo dal presupposto che una misura ottenuta da uno strumento a contatto è sicuramente più precisa e affidabile di una ottenuta da uno strumento ottico, il confronto ha restituito risultati compatibili con la richiesta aziendale di uno scarto che non superi il 10% delle tolleranze richieste. Le tabelle 5.6 e 5.7 ci rendono confidenti nell'utilizzare lo scanner 3D piuttosto che la CMM, sebbene si possa ancora ridurre lo scarto al minimo con una più precisa programmazione dello strumento di Analisi del software ATOS. Per tale ragione, durante il mio periodo di tesi, lo scanner è stato più volte utilizzato per le campionature di nuovi componenti e il controllo di alcune lavorazioni o trattamenti specifici che potessero modificare la configurazione geometrica del pezzo.

In definitiva, lo strumento ottico della GOM® si è rivelato utile e conforme ai

requisiti aziendali. Il lavoro svolto finora, inoltre, apre la strada allo sviluppo e al miglioramento dello strumento e dell'ambiente che lo circonda al fine di trarne il massimo beneficio dal punto di vista economico, delle tempistiche e della ripetibilità.

Elenco delle figure

1.1	<i>9HA.01 Gas Turbine, GE</i>	1
1.2	<i>Struttura di una centrale elettrica con ciclo combinato</i>	2
1.3	<i>Rappresentazione dei cicli Brayton-Joule e Rankine</i>	3
1.4	<i>Dettaglio della turbina a gas 9HA.01, GE</i>	3
1.5	<i>Rappresentazione di una schiera di un compressore assiale</i>	4
1.6	<i>Sezione di una camera di combustione con rappresentazione cromatica del flusso</i>	5
1.7	<i>Schiera di pale di turbina montate sui rispettivi dischi di turbina</i>	6
1.8	<i>Diffusore per i gas esausti di una turbina a gas</i>	7
1.9	<i>Andamento della temperatura massima raggiunta in turbina nell'arco di 50 anni</i>	8
1.10	<i>Implementazione di sistemi di raffreddamento avanzati</i>	9
1.11	<i>Andamento della resistenza in funzione della temperatura dei principali materiali utilizzati</i>	9
2.1	<i>Distribuzione dei popoli del Medio Oriente nel 3500 a.C.</i>	12
2.2	<i>Figura di un animale realizzata con la fusione a cera persa</i>	13
2.3	<i>Traduzione di una tavola</i>	14
2.4	<i>Maschera funeraria di Tutankhamon e figura in oro della dea Nekhbet</i>	14
2.5	<i>Fuso in cui sono ancora presenti i canali di colata.</i>	15
2.6	<i>Stampi in pietra</i>	16
2.7	<i>Dettagli di Perseo con la testa di Medusa</i>	18
2.8	<i>Esempio di fusi realizzati con tecniche e materiali moderni</i>	19
3.1	<i>Pale di turbina con ES, DS, SC.</i>	20
3.2	<i>Stampo di una conchiglia per l'iniezione di una pala storica</i>	22
3.3	<i>Pressa idraulica con capacità di sollevamento pari a 1000 kg</i>	23
3.4	<i>Esempio di anima ceramica da inserire all'interno dello stampo</i>	24
3.5	<i>Schema della pressa idraulica</i>	24

3.6	<i>Esempio di lastra eseguita su un pezzi per controllare la presenza di cricche all'interno</i>	25
3.7	<i>Rappresentazione della misura dello spessore tramite UT</i>	26
3.8	<i>Grappolo composto da sei palette, in cui si distingue la campanella in basso e il sistema di alimentazione in cera</i>	27
3.9	<i>Grappolo appena rivestito del primo strato di alluminato di cobalto e di sabbia molto fine</i>	29
3.10	<i>Esempio di rivestimento completo di un grappolo</i>	30
3.11	<i>Autoclave con relativo sistema di aspirazione dei vapori</i>	31
3.12	<i>Sequenza di colata con forno Roll Over</i>	34
3.13	<i>Schema impianto per potassa</i>	37
3.14	<i>Sezione di pala dopo attacco macro</i>	38
3.15	<i>Taglio di una sezione</i>	39
3.16	<i>Pezzo esposto alla luce UV in cui si evidenziano dei difetti superficiali</i>	40
4.1	<i>Pala rotorica misurata da CMM</i>	43
4.2	<i>Contatto del tastatore con la pala durante l'acquisizione</i>	44
4.3	<i>Rappresentazione del volume di misura e con presenza di marcatori</i>	46
4.4	<i>Rappresentazione delle frange proiettate su una superficie</i>	47
4.5	<i>Rappresentazione del principio di triangolazione</i>	48
4.6	<i>Esempi di marcatori</i>	48
5.1	<i>Macchina in uso</i>	51
5.2	<i>Tavola per la calibrazione</i>	51
5.3	<i>Gabbia cosparsa di marcatori</i>	52
5.4	<i>Marcatori registrati sul software</i>	53
5.5	<i>Operazione di allineamento di due diverse serie di scansioni</i>	54
5.6	<i>Anteprima di una scansione completa</i>	55
5.7	<i>Esempi di possibili modifiche alla mesh</i>	56
5.8	<i>Esempi di inquadratura da diverse angolazioni</i>	58
5.9	<i>Sistemi di misura usati per la raccolta dei tempi</i>	60
5.10	<i>Esempi di principi di misura applicabili ad un elemento nominale per la ricerca del relativo effettivo</i>	62
5.11	<i>Esempio di sezione di una pala con relativi elementi del profilo alare</i>	64
5.12	<i>Esempi di confronto di superficie di due pale statoriche</i>	65
5.13	<i>Esempio di calcolo del diametro di una circonferenza con 3 diversi metodi</i>	67
5.14	<i>Distribuzione normale per 6 dei punti misurati</i>	71

5.15	Distribuzione normale per 2 elementi misurati di 3 sezioni	72
5.16	<i>Vista isometrica del CAD della pala statorica in esame</i>	<i>73</i>

Elenco delle tabelle

5.1	Tempo medio per pezzo con scansione manuale	59
5.2	Tempo per pezzo con misura alla CMM	60
5.3	Confronto tempi di misura	60
5.4	Raccolta delle posizioni dei primi 15 punti di controllo per 10 diverse scansioni del Sulzer 410440	68
5.5	Raccolta delle misure relative a 3 sezioni della pala del Sulzer 410440	69
5.6	a) Riepilogo confronto CMM - ATOS per Sulzer 410440	74
5.7	b) Riepilogo confronto CMM - ATOS per Sulzer 410440	75

Bibliografia

- [1] GE Power Generation D.E. Brandt and R.R. Wesorick. *GE Gas Turbine - Design Philosophy*. Schenectady, NY.
- [2] Ferro GmbH. *Performance Pigments and Colours*. Frankfurt.
- [3] L.B. Hunt. *The Long History of Lost Wax Casting: Over Five Thousand Years of Art and Craftsmanship*, pages 63–79. International Gold Corporation Limited, Londra, 1980.
- [4] H. Limet. *Le Travail du Metal au Pays de Sumer au Temps de la III Dynastie d'Ur'*. Parigi, 1960.
- [5] A. Mahr. *Christian Art in Ancient Ireland*, page 41. Dublino, 1941.
- [6] K.R. Maxwell-Hyslop and W.H.M. Hodges. Iraq, 1964.
- [7] Rajesh Rajkolhe and J.G. Khan. *Defects, Causes and Their Remedies in Casting Process*. International Journal of Research in Advent Technology, 2014.
- [8] A. Ratcliffe. *European Bronze Statuettes*. Londra, 1966.
- [9] GE Energy P.W. Schilke. *Advanced Gas Turbine - Material and Coatings*, pages 4–5. Schenectady, NY.
- [10] GE Energy P.W. Schilke. *Advanced Gas Turbine - Material and Coatings*, page 5. Schenectady, NY.