



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

**SVILUPPO DI UN MODELLO DI COSTO
PARAMETRICO PER COMPONENTI
ASSIALSIMMETRICI BASATO SU TECNICHE DI
MACHINE LEARNING**

**DEVELOPMENT OF A PARAMETRIC COST MODEL
OF AXISYMMETRIC COMPONENTS BASED ON
MACHINE LEARNING TECHNIQUES**

RELATORE:

PROF. MARCO MANDOLINI

TESI DI LAUREA DI:

MATTEO CICCONE

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

I. Ringraziamenti

Desidero ringraziare vivamente il prof. Mandolini e il dott. Manuguerra per la comprensione e la disponibilità mostrati sia nel percorso di tirocinio che nello sviluppo di questa tesi.

Ringrazio poi i miei genitori e i miei fratelli, sempre pronti ad offrire supporto sia emotivo che pratico necessari per il proseguimento degli studi.

Infine ringrazio gli amici con cui ho condiviso l'esperienza universitaria, perché è anche grazie a loro che posso dire che questa è stata una bellissima esperienza.

II. Sommario

I. Ringraziamenti	1
II. Sommario	i
III. Elenco delle figure	iii
IV. Elenco delle tabelle	iv
1 Introduzione	5
2 Stato dell'arte	7
2.1 Tecniche di stima dei costi	7
2.1.1 Tecniche Intuitive	9
2.1.2 Tecniche Analogiche	9
2.1.3 Tecniche Analitiche	10
2.1.4 Tecniche Parametriche	10
3 Metodo	12
3.1 Metodo per lo sviluppo del modello di costo	12
3.2 Gli strumenti utilizzati	13
3.2.1 DVT	13
3.2.2 LeanCOST	16
3.3 Creazione database	17
3.3.1 Moltiplicazione dei records	19
3.3.2 Analisi Pearson	20
3.3.3 Implementazione del database	20
4 Caso studio	22
4.1 Componenti del caso studio	22
4.2 Inserimento delle PMI	23
4.3 Analisi di costo tramite LeanCOST	28
4.3.1 Riconoscimento delle PMI	28
4.3.2 Criteri per lo svolgimento dell'analisi	32
4.4 Raccolta dei dati	35
4.5 Generazione del database esteso	38
4.5.1 Inserimento materiale	38
4.5.2 Scalatura dei modelli	39
4.5.3 Ultime modifiche del database	40

4.6	Analisi DVT	41
5	Risultati e discussione	44
5.1	Risultati dell'analisi	44
6	Conclusioni	49
7	Bibliografia	50

III. Elenco delle figure

Figura 2-1. Classificazione delle tecniche per la stima dei costi.....	7
Figura 3-1. Doppia interfaccia del DVT	14
Figura 3-2. Esempi di grafico costi reali - costi predetti (a sinistra) e grafico di influenza dei fattori di costo sul costo stimato (a destra), ottenuti tramite la GUI mode	15
Figura 3-3. Tabella mostrata dopo un'analisi in Excel mode.....	15
Figura 3-4. Caratteristiche del database	18
Figura 4-1. Comandi utilizzati per l'inserimento delle PMI nei modelli CAD in NX	24
Figura 4-2. Esempio di quota radiale con tolleranza inserite nel foro di un modello	25
Figura 4-3. Esempio di rugosità generale inserita in un modello	26
Figura 4-4. Esempio di rugosità specifica inserita in un modello	26
Figura 4-5. Porzione di schermata LeanCOST del componente Albero (5).....	29
Figura 4-6. Porzione di schermata LeanCOST del componente Albero (6).....	29
Figura 4-7. Legenda facce con rugosità in LeanCOST	30
Figura 4-8. Albero (5) con visualizzazione delle facce con rugosità	31
Figura 4-9. Albero (6) con visualizzazione delle facce con rugosità.....	31
Figura 4-10. Risultato analisi di costo di Albero (5).....	32
Figura 4-11. Risultato analisi di costo di Albero (6).....	32
Figura 4-12. Componente in cui è stata suggerita una strategia di Lastra - Taglio, fresatura	33
Figura 4-13. Componente in cui è stata suggerita la strategia di Lastra - Taglio, piegatura, fresatura..	33
Figura 4-14. Schermata LeanCOST dei Processi, nella modalità di visualizzazione dei centri di costo.	35
Figura 5-1. Influenza dei diversi parametri nei due modelli di costo: a sinistra per il modello di costo della materia prima, a destra per il modello di costo del processo	45
Figura 5-2. Grafici costi reali - costi predetti.	48

IV. Elenco delle tabelle

Tabella 1. Risultati analisi DVT per Costo Materia Prima	45
Tabella 2. Risultati analisi DVT per Costo Processo	47

1 Introduzione

Per un'azienda è fondamentale conoscere quale sarà il costo di un prodotto in fase di progettazione, perciò si stanno sviluppando sempre di più tecniche innovative che offrano supporto ai progettisti per la stima dei costi.

Tra le tecniche innovative spiccano quelle basate sul machine learning, che rispetto alle tecniche tradizionali riescono a fornire dei risultati più veloci e più precisi.

Obiettivo di questa tesi è sviluppare un modello di costo che permetta di prevedere il costo di componenti meccanici assialsimmetrici, una volta che sono noti alcuni dei parametri di questi componenti. Tale modello di costo è appunto definito parametrico ed è stato ottenuto tramite uno strumento che basa il suo funzionamento su tecniche di machine learning.

Nella tesi dunque, dopo aver riassunto brevemente le caratteristiche delle principali tecniche di stima dei costi, si espongono la metodologia impiegata e gli strumenti utilizzati al fine di ottenere il modello di costo parametrico.

Il primo strumento utilizzato è LeanCOST, che ha fornito dati di costo e dati relativi alla geometria e al processo produttivo di modelli assialsimmetrici, importati dal software CAD Siemens NX a LeanCOST.

Questi dati sono stati necessari per fornire le giuste informazioni al secondo strumento utilizzato, DVT, che per poter effettuare la stima del costo necessita infatti di dati sul costo stesso e parametri da cui esso dipende.

Perciò si è creato un database costituito dai modelli assialsimmetrici presi in esame e i loro dati di costo e non. Successivamente si è reso più ampio il database tramite il modulo batch di LeanCOST per fornire più informazioni allo strumento di stima del costo, rendendolo più efficace. In particolare tale modulo ha permesso di inserire un materiale ai modelli e di applicare loro diversi fattori di scalatura, con il risultato della generazione di altri modelli con diversi valori dimensionali e di conseguenza di costo.

Una volta fornito il database definitivo al DVT si è avviata l'analisi di stima del costo dei modelli assialsimmetrici. In particolare si sono effettuate due analisi, una per la previsione del costo della materia prima e una per il costo del processo.

I costi stimati tramite DVT si sono poi confrontati con i costi calcolati in LeanCOST per valutare l'attendibilità del modello di costo, producendo dei risultati accettabili.

Sviluppi futuri che permettano di migliorare i risultati possono consistere in un maggiore ampliamento del database, ottenibile ad esempio inserendo in questo diversi materiali, aggiungendo diversi valori del numero di lotti e altri fattori di scalatura.

2 Stato dell'arte

In questo capitolo si descrivono brevemente le caratteristiche delle tecniche di stima dei costi più utilizzate e conosciute ad oggi, nonché quelle utilizzate in questa tesi per lo sviluppo del modello di costo.

2.1 Tecniche di stima dei costi

Esistono diverse modalità con cui è possibile effettuare una stima di costo di un qualsiasi prodotto, di qualunque natura esso sia.

Come indicato da Niazi e al.[1], una possibile classificazione delle tecniche di stima dei costi può essere quella mostrata nella Figura 2-1:

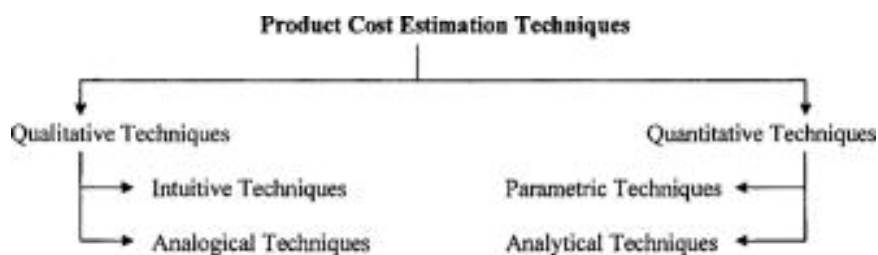


Figura 2-1. Classificazione delle tecniche per la stima dei costi

Dunque una prima classificazione suddivide le metodologie in “tecniche qualitative” e “tecniche quantitative”, e sempre in [1] vengono espone le loro caratteristiche principali, in seguito riassunte brevemente.

Per quanto riguarda le tecniche di stima qualitative, si può affermare in linea generale che esse si basano su analisi comparative effettuate tra i prodotti che sono stati realizzati nel passato, dalla stessa azienda o da altri soggetti, e il prodotto che si desidera realizzare, al fine di individuarne le somiglianze. Somiglianze che poi vengono tradotte in dati utili per stimare in maniera più o meno affidabile il costo del nuovo prodotto. La comparazione offre cioè l'immediato vantaggio di non dover valutare il costo del nuovo prodotto da zero. La conoscenza di dati storici di progettazione e produzione può riuscire a stimare il costo di un nuovo prodotto mediante regole, alberi decisionali oppure modelli di analisi di regressione e approcci di rete neurale. Tali tipologie di tecniche vengono suddivise ulteriormente in "tecniche intuitive" e "tecniche analogiche" e sono esplicate più in dettaglio in 2.1.1 e 2.1.2. Le tecniche di stima qualitative permettono in generale di fornire delle stime veloci ed approssimative e dunque vengono utilizzate principalmente nelle fasi iniziali della progettazione, ovvero durante la concettualizzazione del progetto.

Al contrario, tecniche quantitative, anziché basarsi su dati passati o sulla conoscenza di uno stimatore, si basano su un'analisi dettagliata del design del prodotto, delle sue caratteristiche e dei processi produttivi che gli corrispondono. In particolare i costi sono stavolta calcolati, o utilizzando una funzione analitica con un certo numero di variabili che corrispondono ai diversi parametri che definiscono il prodotto, o come somma di unità elementari che rappresentano diverse risorse consumate durante un intero ciclo di produzione di un determinato prodotto. Essendo queste tecniche più dettagliate e che quindi possano potenzialmente fornire risultati più attendibili, sono utilizzate perlopiù nelle fasi finali del ciclo di progettazione. Sono suddivisibili in "tecniche analitiche" e "tecniche parametriche", e sono approfondite in 2.1.3 e 2.1.4.

2.1.1 Tecniche Intuitive

Le tecniche intuitive di stima dei costi si basano sull'esperienza passata di un esperto o un team di esperti che, servendosi di essa, sono in grado di generare stime di costi di parti ed assieme. Poi le loro conoscenze possono essere archiviate in un luogo specifico, come ad esempio un database, sotto forma di regole, alberi decisionali o giudizi, per rendere più facili e standardizzate le stime di costo prodotti futuri.

2.1.2 Tecniche Analogiche

Le tecniche analogiche consistono nell'utilizzo di dati storici di prodotti con costo noto e nel loro confronto con il prodotto cui si desidera stimare il costo, cercando di identificare delle similarità. I criteri di somiglianza più utilizzati sono due:

1) Modelli di analisi di regressione.

In essi i dati storici di costo sono utilizzati al fine di stabilire una relazione lineare tra i costi dei prodotti del passato e il valore di alcune variabili degli stessi. Le variabili vengono selezionate in maniera tale che possano essere utili a prevedere il costo di prodotti futuri, ovvero vengono scelte le variabili che si pensa possano influire maggiormente sul costo del nuovo prodotto.

Esempi in letteratura di utilizzo di tale approccio sono:

- Hundal [2] e Poli e al.[3]. Si è utilizzato un valore di costo di base e si sono considerati gli effetti dei fattori di costo variabili assumendo come lineari le relazioni tra il costo del prodotto finale e tali variabili;
- Lewis [4] ha utilizzato progetti esistenti per ottenere stime di costo di prodotti simili;
- Pahl e Beitz [5] hanno fornito approcci di stima dei costi più generali basati sulla somiglianza.

2) Modelli di rete neurale di back-propagation (BPNN).

In tali modelli si utilizza una rete neurale (NN) che, se adeguatamente addestrata, è in grado di archiviare la conoscenza per dedurre risposte a domande che non erano state poste alla rete durante il suo "addestramento".

L'uso delle reti neurali per la costificazione nell'ingegneria è discussa da McKim [6].

Esempi di utilizzo di tale metodo:

- Schtub e Zimerman [7] hanno osservato la superiorità del metodo BPNN rispetto a quello di regressione dopo un confronto tra i risultati di costo definiti dai due metodi;
- Zhang e al. [8] hanno proposto un metodo feature-based utilizzando il BPNN per stimare i costi di prodotti di imballaggio;
- Chen e Chen [9] hanno proposto un modello BPNN per un avvolgitore in nastro d'acciaio.

2.1.3 Tecniche Analitiche

Questa tipologia di tecnica propone di scomporre il prodotto in unità elementari, operazioni e attività che vanno a costituire le fasi del ciclo produttivo cui deve essere sottoposto il prodotto in esame per essere realizzato, e di esprimere il costo totale come la somma di tutte queste componenti.

È proprio questa la metodologia utilizzata dal software LeanCOST, uno degli strumenti utilizzati in questa tesi e che verrà descritto nel dettaglio in 3.2.2.

Tale tecnica è utilizzabile solo nelle fasi finali della progettazione a causa delle informazioni che richiede in ingresso, tuttavia fornisce una stima molto accurata e permette di avere informazioni, oltre che sul costo stimato, anche sull'intero ciclo di lavorazione.

2.1.4 Tecniche Parametriche

I modelli di costo parametrici sono ottenuti utilizzando una relazione tra variabili (i parametri per l'appunto) e sono generalmente utilizzati per valutare il costo unitario di un determinato prodotto. Risultano particolarmente efficaci quando sono ben identificabili i fattori di costo, ossia quei parametri che influiscono maggiormente sul costo del prodotto.

Rispetto alla stima analogica, quella parametrica fornisce risultati più accurati, tuttavia è possibile utilizzare questo metodo solo dopo aver identificato uno o più parametri e ideato un algoritmo o una formula per eseguire calcoli specifici.

I calcoli vengono eseguiti su dati storici, come per la tecnica analogica, tuttavia a differenza di essa non sono necessari dati provenienti da prodotti molto simili a quello di cui occorre stimare il costo.

L'algoritmo infatti, o la formula, dovrebbe essere abbastanza efficace da produrre risultati attendibili.

3 Metodo

In questo capitolo si illustreranno i passaggi fondamentali per l'ottenimento di un modello di costo per un determinato componente meccanico e gli strumenti utilizzati.

3.1 Metodo per lo sviluppo del modello di costo

Due sono stati gli strumenti fondamentali utilizzati per ottenere un modello di costo parametrico: DVT, che effettua analisi parametriche (2.1.4), e LeanCOST, che effettua stime di tipo analitico (2.1.3).

Il primo è stato fondamentale proprio in quanto strumento in grado di ottenere un modello parametrico, obiettivo dello studio.

Il secondo strumento è invece servito come "supporto" al primo: ha fornito infatti informazioni quali le stime di costo (analitiche), le fasi del ciclo produttivo e le loro caratteristiche e i parametri geometrici e non geometrici di un certo numero di modelli (quelli che si vedranno nel Caso Studio in 4.1). Si ricorda infatti che metodologie di tipo analitico sono in grado di scomporre il prodotto in un certo numero di fasi e operazioni elementari che vanno a costituire il ciclo produttivo dello stesso.

Tali informazioni sono state indispensabili per il corretto funzionamento del DVT, in quanto hanno fornito ad esso i "dati storici" di diversi prodotti: sia i dati di costo noti che i loro parametri produttivi, ossia le variabili necessarie allo sviluppo di un modello di costo di tipo parametrico.

I due strumenti sono descritti più in dettaglio nei paragrafi sottostanti, 3.2.1 e 3.2.2.

Le informazioni ottenute tramite LeanCOST sono state poi opportunamente registrate manualmente in un file Excel, che va a costituire un database esteso. Esso contiene quindi tutte le informazioni dei prodotti presi in esame e ritenute utili e influenti nel parametro che si desidera predire, ossia il costo.

Come si vedrà in 3.3, per lo sviluppo di un buon modello di costo parametrico, è necessario che nel database sia elevato il numero di “records”, ossia nel nostro caso il numero di prodotti presi in esame, e che le variabili scelte per il modello di costo parametrico siano indipendenti, quindi che tra di esse non vi sia correlazione che porti a una ridondanza di informazioni.

Per ottenere la prima richiesta si è scelto un numero abbastanza elevato di modelli presi in esame, poi questi sono stati moltiplicati tramite il modulo “batch” (3.2.2.2) di LeanCOST, che come si vedrà permette di effettuare una moltiplicazione dei records. Per la seconda richiesta invece è stata effettuata un’analisi Pearson (3.3.2).

3.2 Gli strumenti utilizzati

3.2.1 DVT

Il Digital Value Tool (DVT) è un software sviluppato dal Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell’Università Politecnica delle Marche.

L’utilizzo di tale software trova utilità nella fase di progettazione concettuale del prodotto, in particolare esso consente di effettuare valutazioni di carattere economico integrando modelli di costo ottenuti attraverso tecniche di stima parametrica basate su regressione lineare e soprattutto su machine learning.

Il software è destinato all’utilizzo di progettisti di prodotto o di processo che, grazie ad esso, ricevono un supporto nella stima dei costi.

La Figura 3-1 mostrata di seguito consente di comprendere il funzionamento di tale strumento.

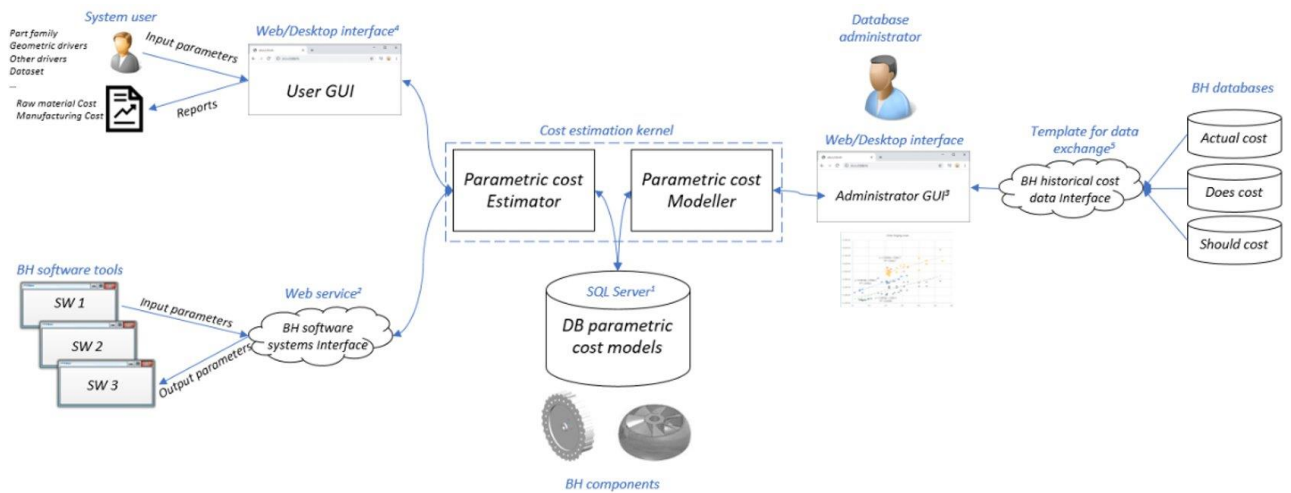


Figura 3-1. Doppia interfaccia del DVT

Esso è accessibile da due tipologie di individui:

- L'utente che, generalmente coincide con il progettista, e che mediante la user interface inserisce nel programma dati di input per ottenere una stima di costo.
- L'amministratore, che interagendo mediante la administrator interface può generare, modificare o eliminare modelli di costo.

L'utente oltre a fornire i dati di input, sceglie il modello di costo più opportuno per la stima, basandosi sulla famiglia di componenti che deve analizzare e che secondo lo schema sopra sono processati dal parametric cost estimator.

Quest'ultimo altro non è che l'insieme degli algoritmi e delle logiche del tool che permettono al progettista di ottenere un feedback in base alle sue azioni.

L'interfaccia utente permette di interagire con il cost estimator in due modi:

- GUI (Graphical User Interface) mode, utilizzata in questo studio;
- Excel mode.

La GUI permette di ottenere oltre alla stima stessa del costo anche un feedback sull'errore commesso dal modello sia attraverso il MAPE che con il coefficiente di determinazione R^2 (si approfondirà questo concetto in 3.3.3).

Infine, in forma grafica si mostrano due grafici che l'interfaccia DVT mostra una volta effettuata un'analisi di costo nella modalità GUI:

- in quello di sinistra si può valutare la precisione della stima, infatti una stima è tanto più precisa quanto il valor medio di stima (in rosso) è vicino alla curva (bisettrice del grafico). Gli altri punti in giallo sono invece le stime su ogni singolo modello;
- in quello di destra si valuta invece l'influenza dei vari fattori di costo sul costo finale predetto.

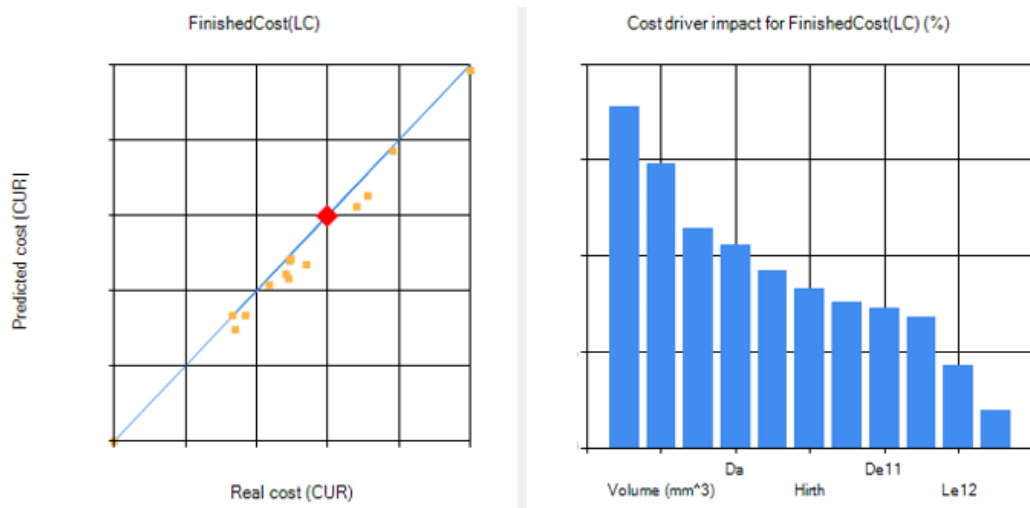


Figura 3-2. Esempi di grafico costi reali - costi predetti (a sinistra) e grafico di influenza dei fattori di costo sul costo stimato (a destra), ottenuti tramite la GUI mode

Nell'Excel mode, invece, il DVT genera una tabella da compilare Figura 3-3. Tabella mostrata dopo un'analisi in Excel mode . Nella intestazione sono presenti i cost drivers del modello di costo selezionato.

Il vantaggio di questa modalità è la possibilità di eseguire più prove insieme.

Sigla_configurazione	N_stadi	Hirth	De11	Dc	Ltot	Volume_(mm^3)

Figura 3-3. Tabella mostrata dopo un'analisi in Excel mode

L'amministratore può gestire i database, caricandone di nuovi, può eseguire una moltiplicazione dei records, una diminuzione del numero delle variabili mediante un'analisi di Pearson, creando così il modello di costo che viene archiviato pronto per l'utilizzo da parte dello user. [11]

3.2.2 *LeanCOST*

LeanCOST è il nome della soluzione software interamente sviluppata da Hyperlean con tecnologia esclusivamente Made in Italy. Hyperlean e LeanCOST nascono infatti dalla collaborazione tra BIESSE GROUP, azienda italiana leader nella meccanica avanzata per l'industria del mobile, e l'Università Politecnica delle Marche. Nel 2010, un team di sei ricercatori di questa università ha iniziato a lavorare insieme per sviluppare sistemi software in grado di ridurre i tempi per la stima dei costi e la produzione di prodotti e processi industriali.

LeanCOST è un sistema software che importa automaticamente i codici prodotto dai progetti CAD o file STEP e restituisce un database di tempi e costi distribuiti nei centri di costo. LeanCOST dispone inoltre di un database completo e personalizzato di processi, materie prime e macchine che consente l'automazione di numerose attività.

3.2.2.1 *Analisi Should Cost*

La tipologia di metodo di stima del costo fornita da LeanCOST rientra tra quelle di tipo "analitico" e l'analisi viene detta di "Should Cost".

Un'analisi di Should Cost consente di determinare quanto dovrebbe costare una parte in funzione di geometria, costo dei materiali grezzi, costi di produzione, costi generali e della maggiorazione che dev'essere tenuta in considerazione in fase di contrattazione con i fornitori.

Per effettuare l'analisi di Should Cost tramite il software, si devono conoscere le seguenti caratteristiche del prodotto:

- Caratteristiche fisiche: i materiali, il processo di fabbricazione, le tolleranze, la complessità, le dimensioni e la geometria.

- Caratteristiche economiche: i volumi annuali e le dimensioni del lotto e se la produzione avviene internamente o esternamente.

Dopodiché il software mette a disposizione una libreria contraddistinta dalle variabili relative alle caratteristiche del prodotto e del processo che raccoglie informazioni su tecnologie, processi, macchinari, costi orari di manodopera in base a geografie distinte, velocità di configurazione, costi generali e tempi.

Tramite un algoritmo che genera un modello di costo si ottengono informazioni relative ai costi sia in forma numerica che grafica. [12]

3.2.2.2 Analisi in batch

Esiste poi un'ulteriore funzionalità di LeanCOST per cui il software è stato utilizzato, ossia il modulo "batch", il quale ha permesso di ottenere una moltiplicazione dei records utile a rendere più preciso e affidabile l'algoritmo.

Cioè tramite questa funzionalità si è ampliato il database moltiplicando i records e calcolato i costi should per ognuno di essi.

Verrà approfondito tale concetto in 3.3.1.

3.3 Creazione database

Di fondamentale importanza per effettuare la stima parametrica è fornire allo strumento di stima (DVT) un database, che contenga informazioni su dei "vecchi" modelli. Si ricorda infatti che un modello di stima parametrica necessita di dati storici di prodotti.

Dunque possono essere utilizzati dei componenti "di riferimento" e da essi estrapolare e registrare le informazioni, cioè parametri geometrici e non, compresi i loro dati di costo ottenibili mediante analisi di should cost.

Perciò un generico database è strutturato come in Figura 3-4 e le caratteristiche che lo definiscono sono quindi:

- N° variabili indipendenti: numero di parametri utilizzati per definire il modello di costo;
- N° di “records”: numero di elementi da cui estrapolare le variabili indipendenti.

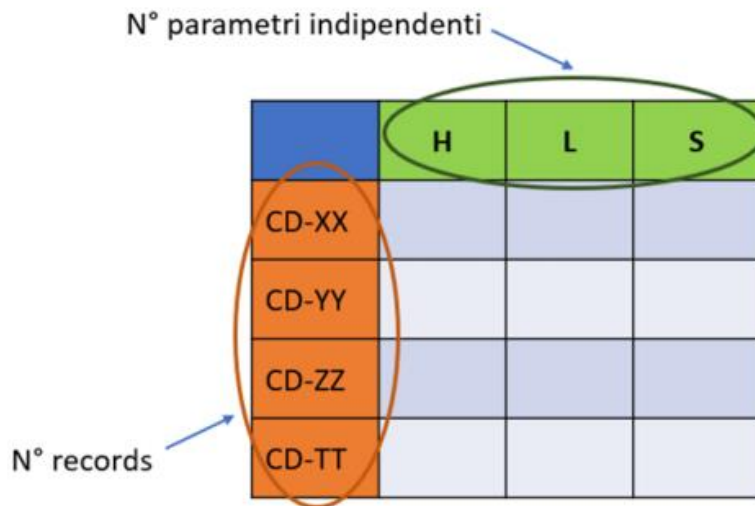


Figura 3-4. Caratteristiche del database

Nel caso studio il numero di records è rappresentato dal numero di componenti presi in esame, mentre il numero di variabili indipendenti costituisce il numero di parametri, geometrici e non, dei vari componenti.

Possono dunque essere riportati, sulle righe di un foglio Excel, tutti i modelli di riferimento, mentre sulle colonne tutti i parametri dei modelli ritenuti significativi quanto all’influenza sul parametro da predire, ovvero il costo. Una volta effettuata un’analisi in LeanCOST per ogni modello sono noti i dati da inserire.

I parametri da selezionare per effettuare una buona stima parametrica del costo devono avere innanzitutto una influenza diretta su quest’ultimo, poi devono essere appunto indipendenti, cioè avere tra di loro una bassa correlazione con il costo. Perciò, a partire dai parametri registrati nel foglio Excel si può successivamente effettuare, all’interno del DVT, un’analisi Pearson (3.3.2), che consenta di ridurre il numero di parametri fino ad ottenere la desiderate variabili indipendenti che influiscano maggiormente sul costo.

Sempre per ottenere una buona stima parametrica, invece il numero di records deve essere più alto possibile e i componenti devono garantire una giusta variabilità per quanto riguarda i valori dei parametri geometrici e non. Il loro numero può essere ampliato mediante il modulo batch di LeanCOST, che permette infatti per ogni singolo modello, di generarne altri tramite l'assegnazione di diversi:

- Materiali, dunque sarà differente il costo e il peso della materia prima;
- Numeri di lotti;
- Fattori di scalatura, dunque saranno diverse le dimensioni dei modelli "generati".

3.3.1 Moltiplicazione dei records

Il processo per la moltiplicazione dei records è il seguente:

1. Si verifica per alcuni componenti presi a campione che ci sia un allineamento dei costi should e actual. In questo modo, si effettua una taratura dell'algoritmo di Leancost.
2. Si compila un database contenente per ogni componente tutte le possibili combinazioni della variabile da maggiorare.
3. Il database così creato viene elaborato da Leancost nella modalità batch che aggiunge al database le colonne per i costi should semilavorati e finiti.
4. Tramite l'algoritmo ricorsivo di moltiplicazione integrato nel DVT, il file Excel contenente il database è aperto e ad ogni passaggio, viene cambiato il valore della variabile da modificare per ogni componente aggiungendola al database.

In questa maniera si genera il maximum case che andrà poi ridotto mediante l'analisi Pearson. [13]

3.3.2 Analisi Pearson

L'analisi Pearson permette di ridurre il numero di variabili utilizzate come parametri del modello di costo, in modo che rimangano soltanto variabili strettamente legate alla variabile dipendente in esame, ovvero il costo, e che queste siano indipendenti.

Basa quindi il suo funzionamento sul concetto di correlazione tra variabili.

Questa correlazione è valutata tramite un indice (indice di correlazione "r") che può variare tra -1 e +1. Lo 0 rappresenta l'assenza di correlazione mentre i casi estremi -1 e +1 rappresentano delle situazioni di perfetta correlazione, opposta nel primo caso e concorde nel secondo.

Il primo passo che effettua l'analisi Pearson per ridurre il numero di parametri è valutare il grado di correlazione tra essi e il costo, sempre tramite l'indice r. Ottenuto il grado di correlazione tra questi, si eliminano le variabili che hanno una bassa correlazione con il costo. Sono considerate situazioni di bassa correlazione casi in cui $r < 0,3$.

Il secondo passo invece consiste nel valutare il grado di correlazione tra un parametro e l'altro, per far sì che restino solo i parametri indipendenti, ossia con bassa correlazione tra di loro. Si eliminano dunque i parametri che hanno alto grado di correlazione ($r > 0,8$).

3.3.3 Implementazione del database

Una volta ottenuto il database definitivo, in DVT è necessario suddividere i dati in esso contenuti in set di "training" e set di "testing".

I dati utilizzati per la fase di training serviranno ad "allenare" l'algoritmo che fornisce la stima, mentre quelli utilizzati per il testing rappresentano i modelli nei quali effettivamente viene effettuata la stima del costo.

Una percentuale tipica di suddivisione dei dati è 80% per la fase di training e 20% per la fase di testing.

Le stime di costo ottenute vengono poi confrontate con i costi ricavati nell'analisi LeanCOST e si ricava l'errore di stima. Il MAPE (Mean Absolute Percentage of Error) fornisce una misura dell'errore valutata su tutti i modelli per i quali si è effettuato il test:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100 \right)$$

Dove:

y_i : valore di riferimento ricavato dall'analisi di Should Cost;

\hat{y}_i : valore predetto;

Naturalmente un basso valore del MAPE è indice di una buona stima parametrica effettuata.

4 Caso studio

In questo capitolo si mostrerà l'applicazione della metodologia precedentemente descritta, ossia quali sono i componenti presi in esame nel caso studio e come è stato possibile, nel dettaglio, effettuare gli step necessari per giungere all'ottenimento del modello di costo.

4.1 Componenti del caso studio

I componenti usati come riferimento per lo sviluppo del modello di costo sono un totale di 73 modelli virtuali, più precisamente modelli CAD 3D.

Il CAD ("Computer Aided Design") è un settore dell'informatica volto all'utilizzo di tecnologie software e della computer grafica con lo scopo principale di supporto virtuale all'attività di progettazione. In particolare un sistema CAD ha come obiettivo la creazione di modelli, soprattutto 3D, di manufatti. Nella maggior parte dei sistemi CAD il modello porta informazioni puramente geometriche del manufatto che si andrà a produrre.

Siemens NX è uno dei sistemi di questo tipo nonché quello utilizzato in questa analisi per reperire i modelli di riferimento.

Caratteristiche comuni che possono essere individuate per la maggior parte dei 73 modelli presi in esame:

- sono tutti identificabili come componenti meccanici (alberi, dischi, rondelle, ecc.);
- sono assialsimmetrici, cioè in essi geometria, proprietà del materiale, carichi, vincoli e condizioni di contatto hanno una simmetria rotatoria intorno a un asse. Fanno eccezione pochissimi componenti, ad esempio uno dotato di eccentrici;

- sono producibili principalmente per operazioni di tornitura. Cioè in essi sono spesso sì individuabili altre operazioni come taglio, foratura, fresatura, ma l'operazione principale per la creazione della maggior parte delle loro features resta la tornitura. Questo è verificabile sia visivamente, notando un'elevata presenza di geometrie cilindriche e coniche, che l'esperienza suggerisce che nella futura produzione di questi componenti tali superfici saranno generabili nella realtà tramite operazioni di tornitura, ma anche dal software utilizzato LeanCOST nel quale, tra i processi visualizzabili nella tendina "Features e Operazioni" (mostrare tra le immagini questa tendina) appare chiaramente la tornitura.

È stata scelta tale tipologia di componenti utilizzati come modello poiché l'obiettivo di tale tesi è fornire un modello di costo apposito per componenti assialsimmetrici e producibili mediante tornitura.

4.2 Inserimento delle PMI

La prima fase dello studio, subito dopo l'acquisizione dei modelli CAD, è stato l'inserimento delle PMI negli stessi.

Le PMI ("Product and Manufacturing Information") sono delle indicazioni, all'interno del modello CAD, che portano informazioni non-geometriche all'interno dello stesso. Sono informazioni manifatturiere sul prodotto che si andrà a sviluppare e le principali sono: tolleranze geometriche e dimensionali, annotazioni e dimensioni 3D, finitura superficiale e specifiche del materiale.

È stato detto precedentemente che il modello 3D porta informazioni esclusivamente geometriche sul prodotto, ma con l'inserimento delle PMI è appunto possibile aggiungere le informazioni in più utili alla produzione dello stesso.

Sono informazioni utili anche ai fini dello sviluppo del modello di costo, poiché indicano implicitamente quali operazioni dovranno essere effettuate nella futura produzione del prodotto e quale dovrà essere il livello di precisione richiesto dalle macchine in grado di produrlo, dunque influiscono direttamente sul costo del processo e quindi sul costo totale del prodotto.

In Figura 4-1 è mostrata la barra per l'inserimento delle PMI, con risalto sui comandi utilizzati per inserirle:

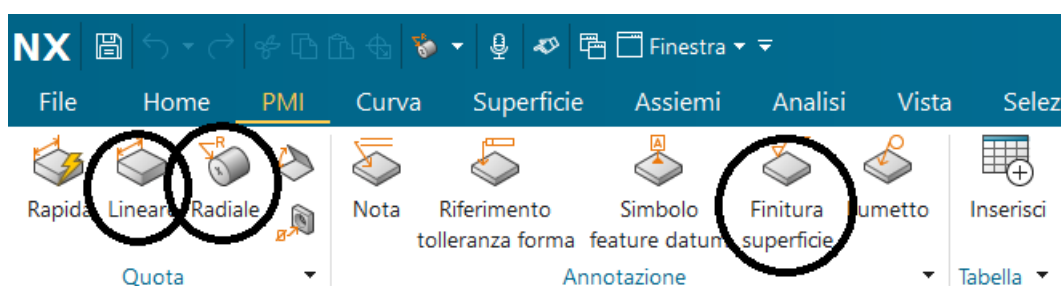


Figura 4-1. Comandi utilizzati per l'inserimento delle PMI nei modelli CAD in NX

Come si vede sono state inserite quote lineari e radiali, dalle quali è possibile aggiungere le informazioni di tolleranza, e finiture superficiali:

- tolleranze dimensionali. Per inserirle in un certo elemento del modello, prima si aggiunge la quota, lineare o radiale, dell'elemento, poi si specifica la tipologia di tolleranza che si desidera inserire, come mostrato in Figura 4-2.

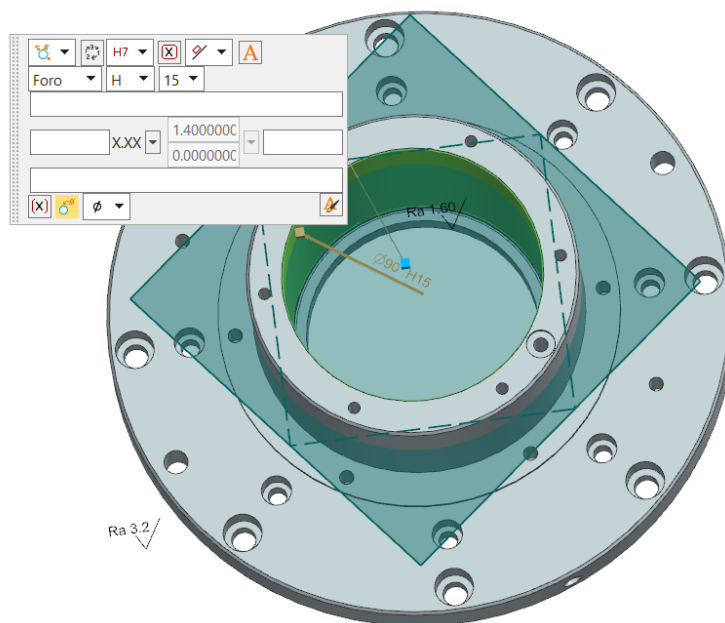


Figura 4-2. Esempio di quota radiale con tolleranza inserite nel foro di un modello

In questo caso quota (radiale di $\varnothing 90$) e tolleranza (H15) sono applicate a un foro. Le tolleranze dimensionali sono state inserite non in tutti i componenti e talvolta sono tolleranze applicate a delle quote radiali e talvolta applicate a delle quote lineari.

- finiture superficiali, applicate alle facce dei componenti ed indicano il livello di rugosità richiesto delle stesse. Sono state inserite:
 - rugosità generali, ossia il massimo livello di rugosità che si troverà nel componente in una faccia qualsiasi. Queste sono state inserite sempre, per ogni modello, scegliendo tutte le facce dello stesso (ad esclusione delle facce con rugosità specifiche, qualora ve ne fossero) tra la selezione degli oggetti interessati dal livello di rugosità scelto come generale;
 - rugosità specifiche, con valori inferiori alla rugosità generale del componente. Sono infatti interessate a questi valori di rugosità quelle facce che dovranno avere i minimi valori di rugosità, relativamente al componente. Sono state inserite solo per alcuni dei modelli (non tutti) selezionando appunto solo le facce interessate dal livello di rugosità scelto come minimo per il componente.

Sono mostrate due figure (Figura 4-3e Figura 4-4) che illustrano l'inserimento di informazioni su rugosità generali e specifiche per lo stesso modello. In questo caso si è applicata una rugosità generale pari a 3.2 Ra e una specifica di 1.60 Ra sulle due superfici interne dei grossi fori centrali del modello.

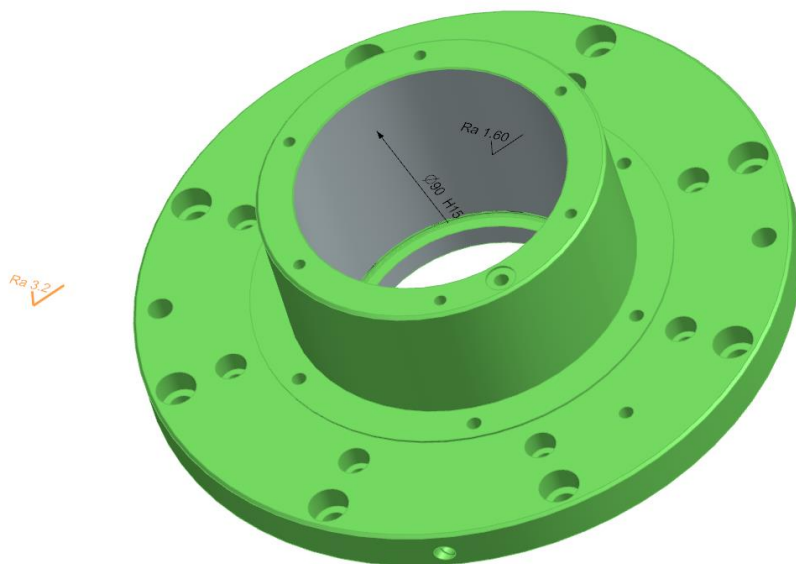


Figura 4-3. Esempio di rugosità generale inserita in un modello

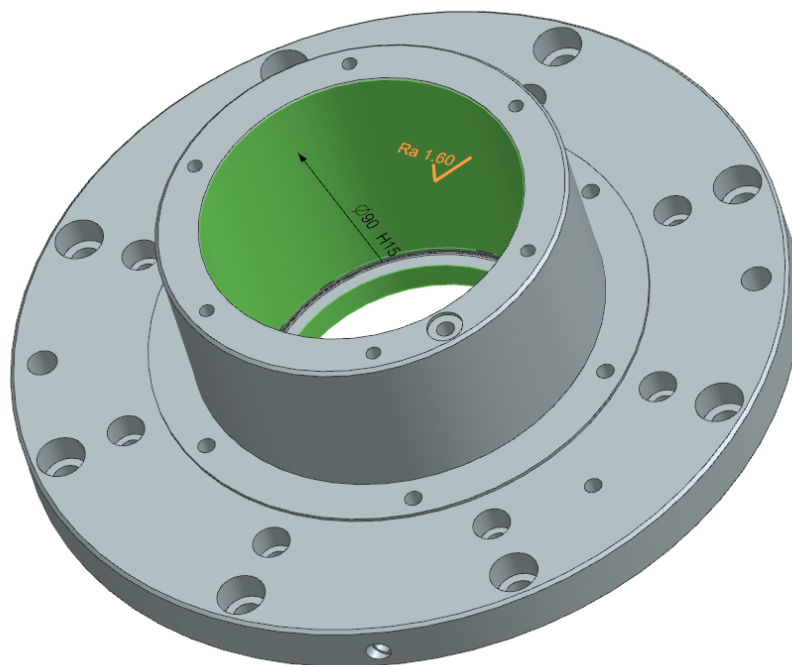


Figura 4-4. Esempio di rugosità specifica inserita in un modello

Sia le facce con rugosità specifiche che le features con indicazioni di tolleranza sono state scelte per alcuni componenti in maniera pressoché aleatoria, ma utilizzando un criterio di buon senso e per cui si avesse una totalità di valori di rugosità e tolleranze piuttosto variegata tra i vari modelli. Infatti più sono eterogenei i valori delle PMI, come qualsiasi altro parametro nei modelli, e più sarà ricco il modello di costo. Questo perché ad esempio, assegnando valori di rugosità abbastanza eterogenei tra i vari modelli, saranno diversi i livelli di precisione richiesti dalle operazioni necessarie a produrre, nella realtà, le facce interessate ai livelli di rugosità selezionati, quindi sarà diverso il costo orario dell'operazione di finitura, quindi si coprirà un range abbastanza ampio di costi orari di questa operazione. Così il modello di costo, che si serve della variazione di certi parametri come ad esempio la variazione di costo in funzione del livello di rugosità, sarà più preciso.

Talvolta poi sono stati assegnati dei valori di rugosità pari a 0,4 o inferiori per introdurre l'operazione di rettificazione che verrà poi riconosciuta da LeanCOST tra le operazioni necessarie per realizzare il componente. Questo è stato fatto sempre per rendere eterogenea l'assegnazione dei valori di PMI ai vari componenti.

Per altri componenti invece, anziché in maniera aleatoria, i valori di rugosità e tolleranze e le features a cui applicarli sono stati inseriti osservando quelli presenti in dei modelli LeanCOST di riferimento che andavano a rappresentare gli stessi componenti dei file NX. Erano cioè dei file LeanCOST in cui si era importato il modello NX. Questi "file LeanCOST Originali" sono serviti per l'appunto solo come riferimento per valori di rugosità e tolleranze da inserire in alcuni dei modelli NX. Per quei componenti in cui invece non era presente il file LeanCOST originale, i valori sono stati inseriti come detto precedentemente a piacere.

Dunque se dapprima i file "originali" di NX (di riferimento) contenevano soltanto informazioni geometriche dei componenti, i file "nuovi" contengono, oltre alle informazioni geometriche, anche delle informazioni manifatturiere, grazie all'inserimento delle PMI, nel caso studio rugosità e tolleranze.

4.3 Analisi di costo tramite LeanCOST

Successivamente alla creazione dei nuovi file NX con l'inserimento di rugosità e tolleranze, questi sono stati importati nel software LeanCOST.

Infatti, come precedentemente detto, esiste la possibilità di integrare LeanCOST con alcuni tra i più noti sistemi CAD 3D commerciali e appunto Siemens NX, software utilizzato nel caso studio, è tra questi. È cioè possibile importare il file NX all'interno di LeanCOST per poter effettuare un'analisi di costo e visualizzare il ciclo completo di lavorazione del componente 3D modellato.

In pratica il risultato di questa integrazione consiste nella capacità da parte del software di effettuare un riconoscimento geometrico del modello e, in virtù di questo, associare a ciascun elemento geometrico riconosciuto (feature) un'operazione e una durata della stessa, che si traducono in un costo, poiché nel software sono noti i costi in €/h (euro/ora) di ciascuna operazione.

A ciascun modello 3D del caso studio è dunque stata effettuata un'analisi in LeanCOST, per un totale di 73 analisi.

4.3.1 Riconoscimento delle PMI

Prima ancora di effettuare l'analisi, si è verificato però che da LeanCOST fossero state lette le PMI precedentemente inserite nei file CAD, ovvero i valori di rugosità e tolleranze inseriti in apposite facce. Infatti LeanCOST non solo è in grado di riconoscere elementi geometrici del CAD ma anche quelli non geometrici dello stesso, quali appunto le PMI.

Si mostra a titolo di esempio come in due componenti perfettamente identici geometricamente e dimensionalmente, l'assegnazione di diversi valori di rugosità e tolleranze e in diverse features in cui sono state applicate, abbiano un effetto diverso sul costo totale dei componenti. Avere due modelli geometrici identici con diversi valori di PMI permette appunto di isolare l'effetto che ha una diversa assegnazione di valori delle stesse, permettendo di valutarne l'influenza che ha sul costo.

I due componenti in questione sono denominati “Albero (5)” e “Albero (6)”. Nelle due figure (Figura 4-5 e Figura 4-6 si mostrano delle porzioni di schermate LeanCOST dei due componenti, dove si denotano sia la perfetta identità geometrica dei due, osservando i modelli 3D, che l’uguaglianza dimensionale, osservando le pari dimensioni di ingombro (104,0 x 104,0 x 22,0 mm) visualizzabili nella sezione “Analisi Modello 3D – Proprietà – Informazioni”.

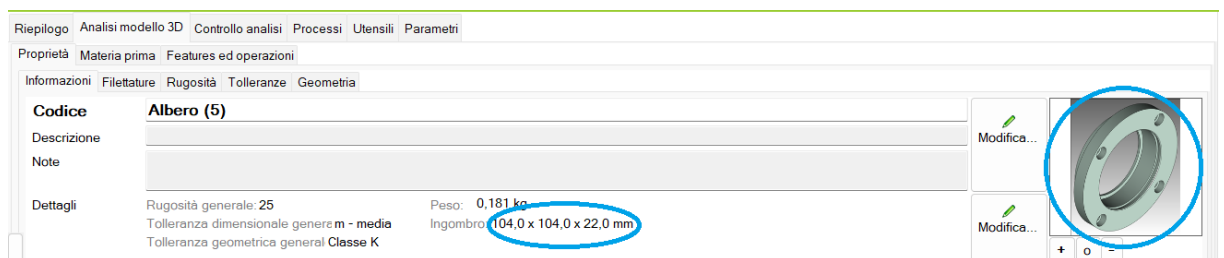


Figura 4-5. Porzione di schermata LeanCOST del componente Albero (5)

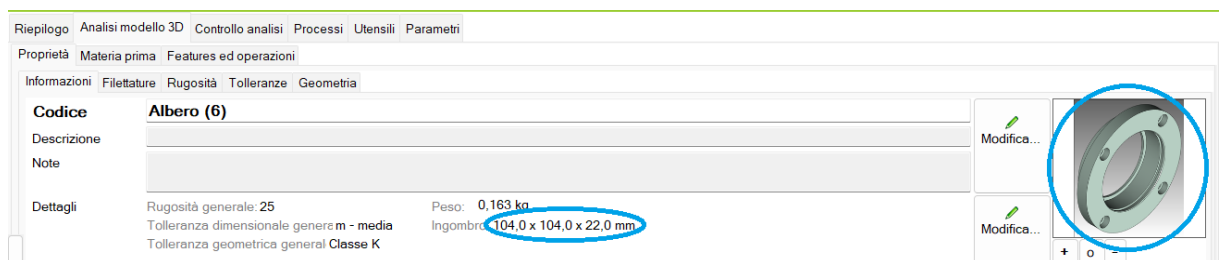


Figura 4-6. Porzione di schermata LeanCOST del componente Albero (6)

Al primo componente, “Albero (5)”, erano poi state assegnate su NX una rugosità generale di 12,5 Ra e una specifica di 0,8 Ra su delle facce interne, mentre al secondo componente “Albero (6)” una rugosità generale di 25 Ra e una specifica di 3,2 Ra sulle superfici cilindriche dei 4 fori presenti nel modello.

Grazie all'anteprima grafica in LeanCOST, in particolare attivando la spunta blu della voce "Visualizza colori facce" presente nella sezione "Analisi modello 3D - Proprietà - Rugosità", è possibile visualizzare nella schermata principale il modello 3D recante le informazioni di rugosità che sono state lette da LeanCOST, cioè che sono state trasferite dal file NX al file LeanCOST oppure inserite manualmente in quest'ultimo.

Infatti LeanCOST associa ad ogni valore di rugosità che è stato letto (o inserito manualmente) ad un colore, secondo la legenda mostrata nella Figura 4-7.

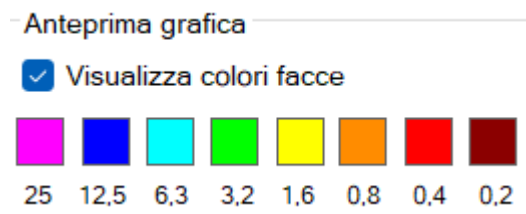


Figura 4-7. Legenda facce con rugosità in LeanCOST

Quindi nella Figura 4-8 e nella Figura 4-9 si può osservare come i valori di rugosità assegnati in NX siano stati letti correttamente da LeanCOST.

Nei casi in cui questi valori non venivano letti, si sono effettuate delle modifiche ai modelli CAD per far sì che questi venissero letti correttamente. Nel migliore dei casi per giungere a tale scopo è stato sufficiente effettuare un rifacimento delle facce incriminate, e questo è il migliore dei casi proprio perché il modello modificato è rimasto totalmente fedele all'originale dal punto di vista geometrico e dimensionale.

In altri casi è stata necessaria una leggera modifica di alcune features in termini di forma e dimensioni, se non addirittura l'eliminazione di alcune di esse.

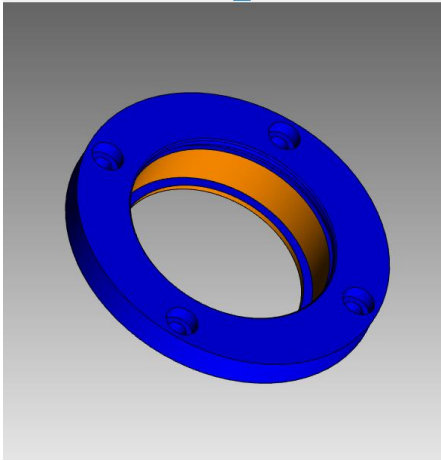


Figura 4-8. Albero (5) con visualizzazione delle facce con rugosità

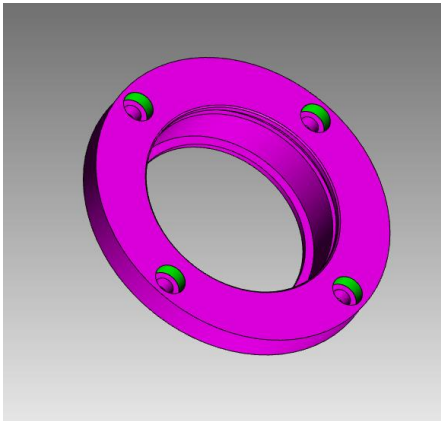


Figura 4-9. Albero (6) con visualizzazione delle facce con rugosità

Dopo aver avviato l'analisi di costo, che si vedrà nel dettaglio in seguito, appare chiaro come il costo totale del primo componente sia più elevato. La differenza di costo tra i due è dovuta sì a delle operazioni di finitura in più presenti nel primo e non nel secondo e da un costo differente dell'operazione manuale di controllo tolleranze (sono stati inseriti infatti anche valori diversi di tolleranze), ma principalmente al costo di setup, maggiore nel primo come si vede in Figura 4-10 e Figura 4-11. Ciò su cui si vuole porre l'accento è che da una diversa scelta di valori di finitura o di tolleranze ne seguono delle differenze, seppur talvolta piccole, all'interno del processo produttivo.



Figura 4-10. Risultato analisi di costo di Albero (5)



Figura 4-11. Risultato analisi di costo di Albero (6)

4.3.2 Criteri per lo svolgimento dell'analisi

Una volta verificato che le PMI fossero state lette correttamente da LeanCOST, si è effettuata l'analisi di costo per ogni singolo componente.

LeanCOST permette di effettuare le analisi secondo diverse strategie, ossia scegliere quale sarà la tipologia del materiale grezzo di partenza e a quale macrocategoria dovranno appartenere le lavorazioni da effettuare sullo stesso. È permessa la scelta di un'ampia gamma di combinazioni e, per ogni modello che si analizza, il software suggerisce una tra queste strategie, quella che viene ritenuta più consona alle caratteristiche, geometriche e non, del prodotto da realizzare.

Si elencano alcune strategie che durante le analisi dei modelli in esame sono state le strategie più suggerite:

- Profilato - Tornitura.

Questa strategia permette di ottenere il componente finito tramite operazioni di tornitura a partire da un profilato come tipologia di materia prima. È stata questa la strategia più suggerita;

- Lastra - Taglio, Fresatura.

In essa la materia di partenza è una lastra e le lavorazioni comprendono inizialmente il taglio della stessa per avvicinarsi alle dimensioni target, poi operazioni di fresatura per produrre le principali features del prodotto finito. Tale strategia è stata suggerita per alcuni componenti che presentavano spessori sottili, dunque era ragionevole che questi potessero provenire da una lastra come materiale di partenza. Un esempio è mostrato in Figura 4-12;

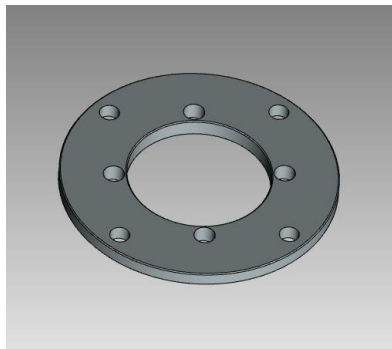


Figura 4-12. Componente in cui è stata suggerita una strategia di Lastra - Taglio, fresatura

- Lastra - Taglio, piegatura, fresatura.

Come la precedente, ma con un'operazione intermedia di piegatura. Nello studio tale strategia è stata suggerita solo per un componente, mostrato in Figura 4-13, dove appare chiaro come esso sia facilmente producibile tramite imbutitura.

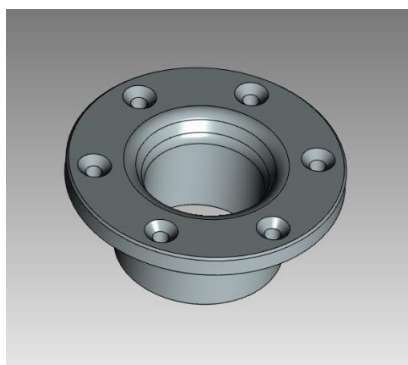


Figura 4-13. Componente in cui è stata suggerita la strategia di Lastra - Taglio, piegatura, fresatura

Sono poi presenti molte altre strategie, non incontrate in questo studio, come ad esempio fresatura a partire da un blocco pieno, estrusione e non sono escluse anche operazioni di fonderia come forgiatura a stampo chiuso o aperto e fusione in terra.

Per esigenze di semplicità della trattazione, in questa fase di analisi con LeanCOST la strategia che si è sempre adottata è stata quella di tornitura a partire da un profilato, anche quando questa veniva suggerita.

Una volta scelta la strategia dunque si è avviata l'analisi per ciascuno dei componenti, e i risultati per ognuno di essi sono stati:

- ottenimento del costo totale, di cui come visto in Figura 4-10 e Figura 4-11 LeanCOST fornisce anche una suddivisione in: costo materia prima, costo investimento, costo setup, costo accessorio, operazioni, altri costi;
- ottenimento di informazioni sulla geometria e le dimensioni del materiale grezzo da lavorare;
- ottenimento di altre informazioni come il numero dei centri di costo, ovvero il numero di raggruppamenti che si possono effettuare in base al tipo di macchinario (o manodopera) utilizzato tra i processi produttivi indicati da LeanCOST a seguito di un'analisi.

In Figura 4-14 è mostrata una schermata che permette di visualizzare i processi necessari per realizzare un componente preso come esempio, e in particolare i centri di costo in cui questi sono suddivisi. Nell'esempio i centri di costo sono tre, che raggruppano i processi tra operazioni di taglio, di tornitura e operazioni manuali.

Centri di costo		Visualizza features	Mostra/Nascondi...	Filtro:	X	OFF		
Centri di costo	Features		Tempo unitar..	Costo unitar..	Tempo total...	Costo total...		
[-] Taglio profilati - 25 EUR/h					13.86	5.77		
[-] Taglio di sega	<input checked="" type="checkbox"/>		1	3.86	1.61	1	3.86	1.61
[-] Tornio da ripresa con motorizzati ...					82.97	70.69		
[-] Sfacciatura (Sgrossatura)	<input checked="" type="checkbox"/>		2	0.09	0.08	1	0.09	0.08
[-] Sfacciatura (Sgrossatura)	<input checked="" type="checkbox"/>		3	0.08	0.07	1	0.08	0.07
[-] Tornitura cilindrica esterna (Sg...	<input checked="" type="checkbox"/>		4	0.06	0.06	1	0.06	0.06
[-] Profilatura cilindrica (Sgrossatura)	<input checked="" type="checkbox"/>		5	0.05	0.05	1	0.05	0.05
[-] Tornitura cilindrica interna (Sg...	<input checked="" type="checkbox"/>		6	0.06	0.05	1	0.06	0.05
[-] Centrinatura	<input checked="" type="checkbox"/>		7	0.05	0.04	4	0.20	0.18
[-] Foratura	<input checked="" type="checkbox"/>		8	0.02	0.01	4	0.06	0.06
[-] Tempo di attraversamento in ra...	<input checked="" type="checkbox"/>		9	0.01	0.01	2	0.02	0.02
[-] Centrinatura	<input checked="" type="checkbox"/>		10	0.05	0.04	4	0.20	0.18
[-] Foratura	<input checked="" type="checkbox"/>		11	0.02	0.02	4	0.07	0.06
[-] Tempo di attraversamento in ra...	<input checked="" type="checkbox"/>		12	0.01	0.01	2	0.02	0.01
[-] Sfacciatura (Finitura)	<input checked="" type="checkbox"/>		14	0.04	0.04	1	0.04	0.04
[-] Sfacciatura (Finitura)	<input checked="" type="checkbox"/>		15	0.04	0.03	1	0.04	0.03
[-] Tornitura cilindrica esterna (Fini...	<input checked="" type="checkbox"/>		16	0.03	0.03	1	0.03	0.03
[-] Profilatura (Finitura)	<input checked="" type="checkbox"/>		17	0.01	0.01	1	0.01	0.01
[-] Profilatura (Finitura)	<input checked="" type="checkbox"/>		18	0.04	0.04	1	0.04	0.04
[-] Tornitura cilindrica interna (Fini...	<input checked="" type="checkbox"/>		19	0.02	0.02	1	0.02	0.02
[-] Operazione manuale - 30 EUR/h						5.00	2.50	
[-] Controllo	<input checked="" type="checkbox"/>		13	5.00	2.50	1	5.00	2.50

Figura 4-14. Schermata LeanCOST dei Processi, nella modalità di visualizzazione dei centri di costo.

4.4 Raccolta dei dati

Effettuata l'analisi per ogni singolo componente si sono raccolti in un file Excel i dati ritenuti utili per la successiva fase di analisi parametrica in DVT. Questi dati sono:

- 1) Dati risultanti dall'analisi LeanCOST che si sono citati nel precedente paragrafo (4.3.2), quindi:
 - o Costi:
 - costo totale [€];
 - costo della materia prima [€]. Il suo valore dipende dal materiale specificato nel modello e dalla quantità di materiale, cioè dalle sue dimensioni;

- costo del processo [€]. Questo è stato ottenuto sottraendo il costo della materia prima a quello totale, che sono invece mostrati esplicitamente in LeanCOST;
 - costo unitario del materiale [€/kg]. Rappresenta il costo della materia prima diviso per il suo peso.
 - caratteristiche del grezzo:
 - tipologia: tondo o tubo;
 - Diametro esterno [mm];
 - Diametro interno ($\neq 0$ se tubo, $=0$ se tondo) [mm];
 - Lunghezza [mm];
 - Volume [mm³].
 - Caratteristiche del processo quali il numero dei centri di costo;
- 2) Dati geometrici e non geometrici dei componenti, quindi non provenienti strettamente da un'analisi LeanCOST ma insiti nei modelli CAD 3D (anche dopo l'aggiunta delle PMI). Sono stati inseriti infatti:
- Dimensioni di ingombro D1, D2, D3 [mm]. D1 e D2 rappresentano le massime estensioni del modello in direzione radiale, mentre D3 in quella assiale;
 - Tipologia di finito: se pieno o cavo;
 - Diametro interno: $\neq 0$ se cavo, $=0$ se pieno [mm];
 - Volume [mm³] e superficie totale [mm²] (misurate però in LeanCOST);
 - Numero di superfici;
 - Tolleranza minima [IT];
 - Rugosità minima e standard [Ra];
 - Superficie con rugosità minima e superficie con rugosità standard [mm²];
 - Presenza o meno di particolarità nella geometria del componente cioè:
 - Geometrie non coassiali, ad esempio fori con asse parallelo o perpendicolare a quello principale del pezzo;

- Geometrie fresatura, ossia qualsiasi elemento ottenibile mediante fresatura;
 - Sedi per anelli;
 - Sedi per linguette/chiavette.
- 3) Formule create appositamente in Excel che mettono in relazione alcuni parametri geometrici e non geometrici e parametri dell'analisi:
- Rapporto tra la dimensione minima e quella massima tra quelle di ingombro D1, D2, D3 [adimensionale];
 - Valore della diagonale del parallelepipedo definito dalle dimensioni di ingombro [mm];
 - Volume di ingombro [mm³];
 - Rapporto tra volume finito e volume di ingombro [adimensionale];
 - Rapporto tra superficie e volume del finito [mm⁻¹];
 - Rapporto tra superficie con rugosità standard e superficie totale [adimensionale];
 - Rapporto tra volume finito e volume del grezzo [adimensionale].

Tutte queste informazioni vanno a costituire il database iniziale necessario per fornire i dati in ingresso allo strumento di stima parametrica, in particolare le informazioni sopracitate costituiscono i parametri, non definitivi, del modello di costo. Non sono definitivi in quanto il loro numero sarà in seguito ridotto tramite l'analisi Pearson, vista in 3.3.2. Invece come abbiamo visto i records corrispondono ai modelli presi in esame.

4.5 Generazione del database esteso

La fase successiva al raccoglimento dei dati è stata la moltiplicazione dei records, ottenuta in questo caso esclusivamente tramite una scalatura dei modelli, poiché è stato inserito un solo materiale per ogni componente. Invece per quanto riguarda i fattori di scalatura, ne sono stati assegnati due per ogni componente. Quindi considerando che ogni componente abbia sia le dimensioni originarie che due scalate, si hanno infine 3 modelli per ogni componente iniziale, dunque un totale di $73 \times 3 = 219$ modelli, che va a costituire un sufficiente numero di records per sviluppare un modello di costo.

Sia la scalatura che l'inserimento del materiale sono stati possibili tramite il modulo batch di LeanCOST.

4.5.1 Inserimento materiale

È necessario, per avere un database completo, l'inserimento di almeno un materiale per componente. L'analisi fatta in precedenza con LeanCOST per i 73 componenti è stata eseguita senza selezionare un materiale, così il software ha fornito in automatico diversi materiali per ogni componente.

Per rendere omogenea la trattazione, è stato inserito tramite il batch lo stesso materiale per tutti i componenti, nel caso studio si è scelto l'acciaio strutturale al carbonio S235JR.

4.5.2 Scalatura dei modelli

La scalatura dei modelli consiste nell'assegnazione di fattori di scalatura alle dimensioni che definiscono i modelli 3D. Questi fattori sono cioè dei valori che vengono moltiplicati per tutti i tre parametri con cui possono essere definite le dimensioni del modello nello spazio. La scalatura può essere omogenea, se tutti i parametri geometrici di un dato modello vengono moltiplicati per lo stesso fattore, o eterogenea se almeno due dimensioni sono moltiplicate per fattori diversi. Può essere poi una scalatura di ingrandimento se il fattore è >1 , di riduzione se <1 .

Si è applicata una scalatura omogenea, cioè tutte le 3 dimensioni di un certo modello sono state moltiplicate per lo stesso fattore di scalatura, per cui non si è variata la morfologia rispetto ai modelli originari (no allungamenti o accorciamenti) ma solo le dimensioni.

Poi si sono effettuati sia ingrandimenti che riduzioni di dimensioni, secondo tale criterio:

- Per modelli particolarmente piccoli si sono applicati esclusivamente fattori di ingrandimento;
- Per modelli grandi si sono applicate solo riduzioni.

Ciò è stato fatto per avere una totalità di modelli che ricoprisse intervalli dimensionali piuttosto omogenei, cioè per fare in modo che vi fosse un numero simile di modelli piccoli e di modelli grandi.

Per raggiungere tale scopo si sono suddivisi tutti i componenti in 4 categorie in base alla massima dimensione di ingombro (tra le 3 visionabili anche in LeanCOST denominate D1, D2, D3) e si sono applicati per ogni categoria 2 valori del fattore di scalatura (diversi tra di loro e diversi tra una categoria e l'altra):

- 0,05 - 0,25 per la prima categoria di oggetti "grandi". Tali fattori comportano infatti una grande riduzione di dimensioni;
- 0,25 - 2 per la seconda categoria di oggetti "medio - grandi";
- 2 - 4 per la terza categoria di oggetti "medio - piccoli";

- 2,25 - 6 che comportano i più elevati ingrandimenti per la quarta categoria di oggetti "piccoli".

Inoltre il valore di tali fattori è stato scelto in modo da non andare oltre certi valori dimensionali troppo elevati poiché altrimenti, come è risultato per alcuni dei modelli nemmeno ancora scalati, non sarebbe stato possibile da parte di LeanCOST trovare la materia grezza da lavorare. Infatti LeanCOST possiede un archivio di materie prime non infinito dal punto di vista delle loro dimensioni ma limitato poiché si confà alla realtà, ossia perché è limitato anche il set di dimensioni di materie prime che possono essere fornite nella realtà per effettuare una data lavorazione.

4.5.3 Ultime modifiche del database

Una volta effettuata la scalatura dei modelli e assegnato loro il materiale, tramite il batch è stato possibile effettuare anche per questi nuovi modelli, 219 in totale, l'analisi di costo. Tuttavia non è stato possibile utilizzare tutti questi modelli per effettuare la successiva analisi DVT, poiché per alcuni di essi non è andata a buon fine l'analisi in batch, per il sopracitato problema riguardante le dimensioni degli stessi. Cioè, per alcuni, LeanCOST non è riuscito a fornire tra la sua libreria una materia prima per i componenti problematici, dato il materiale assegnato. Si tratta comunque di pochi componenti, solo 5 di cui 3 scalati e 2 con dimensioni originarie, tutti caratterizzati da grandi dimensioni di ingombro.

Perciò i modelli si sono ridotti a 214.

Successivamente si sono aggiunti altri due parametri, ovvero due formule inerenti il costo:

- Costo materia prima/peso del grezzo;
- Costo processo/peso asportato.

Per "peso asportato" si intende la quantità di materiale, in kg, che è stato rimosso durante la lavorazione dalla materia prima per arrivare al prodotto finito.

Di tre ulteriori componenti è stata messa in luce la problematicità tramite la seconda formula. Infatti per due di essi la formula non ha fornito un risultato mentre per il terzo il risultato è stato negativo.

Tali componenti sono stati perciò rimossi e si è scesi a 211 modelli, che rappresentano il numero finale di records. Numero comunque sufficiente per essere fornito al modello di costo.

Perciò il database esteso finale è costituito da:

- Numero di records pari a 211 modelli;
- Parametri elencati in 4.4. più le due nuove formule aggiunte.

Tale database è quello comprensivo del più alto numero di parametri e del più alto numero di modelli “non problematici”.

4.6 Analisi DVT

Ottenuto il database finale, comprensivo quindi del più alto numero di parametri e del più alto numero di modelli “non problematici” si è infine potuto utilizzare lo strumento per le stime parametriche, il DVT.

In particolare si sono effettuate due stime di costo: in un’analisi si è cercato di prevedere il costo della materia prima, nell’altra il costo del processo.

Per entrambe le analisi circa l’80% dei modelli è stato utilizzato per la fase di training mentre circa il 20% per la fase di testing, perciò tra i 211 modelli ne è stato predetto il costo di 45 di essi, in ognuna delle due analisi.

Si è poi ridotto il numero di parametri tramite l’analisi Pearson.

Sono stati dunque riportati in due differenti file Excel, uno per il costo della materia prima e uno per il processo:

- Le variabili indipendenti definitive risultate dall’analisi di Pearson;
- I valori del costo precedentemente valutati con LeanCOST (cioè quelli presenti nel database esteso) dei 45 modelli corrispondenti a quelli usati nella fase di testing;
- I valori stimati tramite DVT dei 45 modelli di testing.

Dopodiché si sono confrontati i valori stimati con quelli calcolati in LeanCOST e calcolato il MAPE, indice di affidabilità della stima effettuata.

Nei fogli Excel sono stati indicati anche il costo totale, inteso come la somma tra i costi di ognuno dei 45 modelli calcolati con LeanCOST, il costo totale “predetto”, cioè la somma dei costi stimati dei modelli dal DVT e lo scostamento percentuale tra queste due somme.

Infine è stata anche calcolata una media pesata dell’errore rispetto al valore economico, cioè una sorta di MAPE ma che tiene in considerazione anche l’entità del costo del modello calcolato con LeanCOST.

Tale media pesata è stata introdotta perché, se presente un grosso scostamento tra costo calcolato e costo stimato per un modello piccolo, quindi poco costoso, l’errore non ha molto impatto sullo scostamento di costo complessivo. Invece se ciò accade per un modello grande dunque costoso, è più influente l’impatto che questo ha sull’errore complessivo.

Ciò che è infatti di rilevanza è conoscere non tanto l’errore di stima di ogni singolo modello, ma l’impatto che questo ha sull’errore complessivo.

Inoltre in seguito all'ottenimento delle variabili indipendenti dall'analisi Pearson, si è utilizzata una tecnica, il Feature Permutation Importance, che permette di interpretare il modello di costo, valutando se le scelte fatte dall'algoritmo sono corrette o comunque logiche. Operativamente il metodo misura l'importanza di una feature calcolando l'aumento dell'errore di previsione del modello dopo aver permutato la feature (variabile). Una feature è "importante" se mescolando i suoi valori aumenta l'errore del modello, perché in questo caso il modello si basa sulla feature per la previsione. Una feature è "non importante" se mescolando i suoi valori rimane invariato l'errore del modello, perché in questo caso il modello ha ignorato la feature per la stima. Il limite più importante del Feature Permutation Importance è che non tiene conto della correlazione tra i parametri, per questo motivo si preferisce non utilizzarlo per la selezione delle feature più importanti, ma lo si sceglie come metodo per l'interpretazione del modello, ovvero per evitare di utilizzare il modello come una Black-box, il FPI viene in aiuto permettendo di comprendere il peso delle feature all'interno del modello per la predizione e quindi indirettamente avere informazioni su quali feature e in che modo intervenire per abbassare i costi.

Sono descritti in seguito gli esiti delle due analisi.

5 Risultati e discussione

5.1 Risultati dell'analisi

Per quanto riguarda la stima del costo della materia prima, l'analisi Pearson ha fornito le seguenti variabili indipendenti:

- Dimensione di ingombro D2;
- Superficie con rugosità minima;
- Costo unitario del materiale;
- Lunghezza del grezzo;
- Volume di ingombro.

Invece quanto alla stima del costo del processo le variabili indipendenti sono risultate:

- Dimensione di ingombro D2;
- Numero superfici;
- Superficie rugosità minima;
- Presenza geometrie fresatura;
- Presenza sede per linguette/chiavette;
- Costo unitario materiale;
- Lunghezza grezzo;
- Numero centri costo;
- Volume ingombro.

Il Feature Permutation Importance ha prodotto i risultati visibili in Figura 5-1, in cui è evidente per entrambi i modelli la grande influenza del volume di ingombro sul costo.

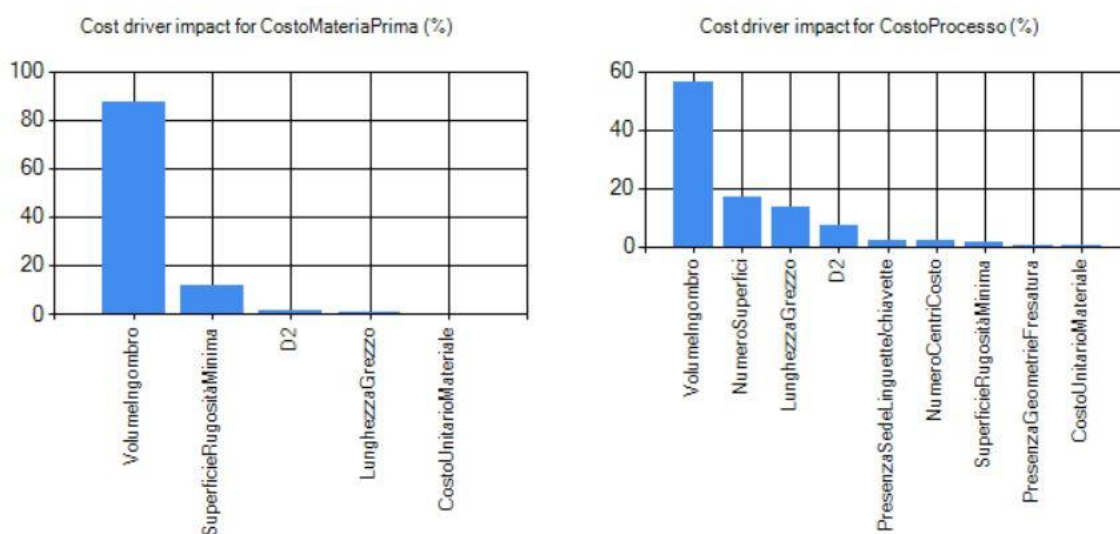


Figura 5-1. Influenza dei diversi parametri nei due modelli di costo: a sinistra per il modello di costo della materia prima, a destra per il modello di costo del processo

In base a questi parametri ottenuti il DVT ha fornito delle stime di costo della materia prima per i 45 modelli e il valore del MAPE è risultato pari al 54%, mentre la media pesata rispetto al valore economico pari al 17% e un errore tra costo totale calcolato e quello stimato del -14% (segno meno che indica una sottostima) come indicato in Tabella 1.

Tabella 1. Risultati analisi DVT per Costo Materia Prima

MAPE	54%
Media pesata rispetto al valore economico	17%
Costo totale	7633,3169

Costo totale	6542,7808
predetto	
	-14%

Si riportano in seguito le formule che mostrano come sono stati ottenuti i valori presenti in tabella:

- $MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \times 100 \right)$, dove
 n=45, numero di modelli utilizzati per la fase di testing;
 y_i =valore di costo calcolato tramite l'analisi di Should Cost dell'i-esimo componente;
 \hat{y}_i =valore predetto dell'i-esimo componente.
- $Media\ pesata\ rispetto\ al\ valore\ economico = \frac{1}{costo\ totale} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \times 100$
- Costo totale = somma dei costi della materia prima calcolati con l'analisi di Should Cost dei 45 modelli di testing;
- Costo totale predetto=somma tra i costi della materia prima predetti dei 45 componenti di testing;
- $Scostamento\ percentuale\ tra\ costo\ totale\ e\ costo\ totale\ predetto = \frac{costo\ totale\ predetto - costo\ totale}{costo\ totale} \times 100$

Anche qui dal confronto tra i costi predetti e quelli calcolati con LeanCOST si è calcolato il MAPE, che è risultato pari al 29%, la media pesata pari al 39% e l'errore tra costo totale calcolato e quello stimato del -25% (anche qui sottostima e di maggiore entità). Risultati visualizzabili anche in Tabella 2:

Tabella 2. Risultati analisi DVT per Costo Processo

MAPE	29%
Media pesata rispetto al valore economico	39%
Costo Totale	8937,395
Costo Totale predetto	6733,085
	-25%

Qui le formule usate sono le stesse, cambia solamente che i valori di costo sono riferiti al costo di processo anziché di materia prima.

In Figura 5-2 si mostrano infine i grafici costi reali - costi predetti che appaiono nell'interfaccia DVT una volta effettuata l'analisi.

Quelli in alto si riferiscono alla fase di testing, quelli in basso alla fase di training, di cui quelli a sinistra al modello di costo della materia prima e quelli a destra al modello di costo del processo.

Si ricorda che in essi si mostra graficamente la precisione della stima: questa è tanto più precisa quanto gli elementi in giallo, che rappresentano i valori stimati dei singoli componenti, si mantengono vicini alla bisettrice.

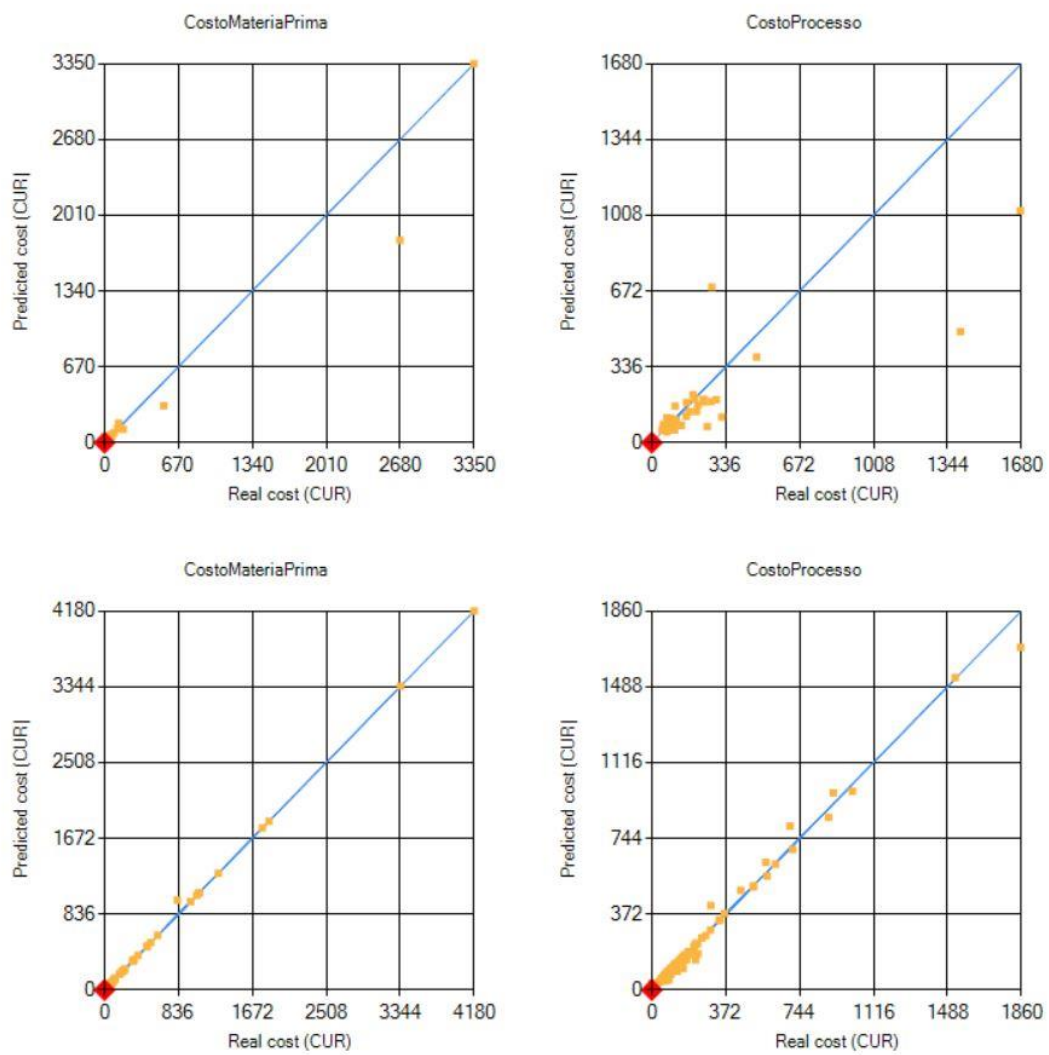


Figura 5-2. Grafici costi reali - costi predetti.

6 Conclusioni

L'obiettivo iniziale era di ottenere un modello di costo parametrico che fosse in grado di prevedere il costo di componenti meccanici assialsimmetrici.

Sono stati ottenuti due modelli: uno che riesce a stimare il costo della materia prima di un componente assialsimmetrico e l'altro che riesce a stimarne il costo del processo.

In entrambi i casi i risultati, cioè i valori dei costi stimati, si ottengono solo fornendo dei dati in input al modello di costo. Questi dati da fornire in input sono i parametri ritenuti, da un'analisi Pearson, come i più influenti sul costo da stimare.

Se dunque non si conosce né il costo di materia prima né di processo di un qualsiasi componente assialsimmetrico ma si conoscono invece i valori dei parametri relativi a tale componente, i due modelli di costo permettono di ottenere tali valori, con un livello di errore accettabile:

- Per il modello di costo della materia prima si ha un MAPE del 54% e un errore pesato rispetto al valore economico del 17%;
- Per il modello di costo del processo si ha un MAPE del 29% e un errore pesato rispetto al valore economico del 39%.

L'ottenimento di migliori risultati tramite un perfezionamento dell'algoritmo può essere ottenuto in vari modi:

- Avendo più modelli originari e con geometrie più diversificate possibile a disposizione dell'algoritmo;
- Aggiungendo dei parametri che possono risultare rappresentativi ed efficaci;
- Effettuando una più ampliata moltiplicazione dei modelli ad esempio aggiungendo diversi materiali, aumentando il numero di lotti e aggiungendo altri fattori di scalatura.

7 Bibliografia

- [1] A. Niazi, J.S. Dai, S. Balabani, L. Seneviratne, *Product Cost Estimation: Technique Classification and Methodology Review*, J. Manuf. Sci. Eng. 128 (2006) 563-575.
- [2] M. S. Hundal, *Design to Cost*, Concurrent Engineering: Contemporary Issues and Modern Design Tools, H. R. Parsaei and W. G. Sullivan, eds., Chapman and Hall, London, (1993) 330-351.
- [3] C. Poli, J. Escudero, R. Fernandez, *How Part Design Affects Injection-Moulding Tool Costs*, Mach. Des. 0024-9114, 60(1), (1988) 101-104.
- [4] J. Lewis, *Metrics Mapping Cuts Estimating Time*, Des. News 0011-9407, 55(18), (2000) 107-110.
- [5] G. Pahl, W. Beitz, *Engineering Design: A Systematic Approach*, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin (1996).
- [6] R. A. McKim, *Neural Network Applications to Cost Engineering*, Cost Eng. 0274-9696, 35(7), (1993) 31-35.
- [7] A. Shtub, Y. Zimmerman, *A Neural-Network-Based Approach for Estimating the Cost of Assembly Systems*, Int. J. Prod. Econ. 0925-5273, 32(2), (1993) 189-207.
- [8] Y. F. Zhang, J. Y. H. Fuh, W. T. Chan, *Feature-Based Cost Estimation for Packaging Products Using Neural Networks*, Comput Ind. 0166-3615, 32, (1996) 95-113
- [9] M. Y. Chen, D. F. Chen, *Early Cost Estimation of Strip-Steel Coiler Using BP Neural Network*, Proceedings of 2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Beijing, Piscataway, NJ, Vol. 3, (2002) 1326-1331
- [10] J. Y. Jung, 2002, *Manufacturing Cost Estimation for Machined Parts Based on Manufacturing Features*, J. Intell. Manuf. 0956-5515, 13(4), (2002) 227-238
- [11] S. Marcozzi, *Valutazione di design alternativi di macchine turbogas sulla base di stime di costo parametriche*, (2020-2021), 33-37
- [12] S. Marcozzi, *Valutazione di design alternativi di macchine turbogas sulla base di stime di costo parametriche*, (2020-2021), 47-48
- [13] S. Marcozzi, *Valutazione di design alternativi di macchine turbogas sulla base di stime di costo parametriche*, (2020-2021), 48-49