

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea di II Livello in Ingegneria Meccanica

Tesi di II livello



**Politecnico
di Torino**

**PREVISIONE DELLA VITA DEGLI
STAMPI MEDIANTE IL MODELLO
DEGLI ELEMENTI FINITI**

Relatore

Prof. Dario Antonelli

Correlatore

Prof. Gianfranco Genta

Candidato

Gaetano Carlucci

Matricola 254188

Anno Accademico 2020/2021

“Don’t crack under pressure”

Ringraziamenti

Desidero ringraziare vivamente il Prof. Dario Antonelli e il Prof. Gianfranco Genta per la Loro disponibilità, attenzione, professionalità e per i Loro preziosi consigli.

Ringrazio la mia famiglia per il supporto morale e materiale ricevuto in questi anni e per essermi stata vicino nei momenti più difficili.

Ringrazio inoltre di cuore la mia ragazza, i miei colleghi e gli amici per aver creduto in me e per aver reso il cammino meno duro.

Indice

Elenco delle figure	8
1 Introduzione	10
1.1 Scopo della tesi	10
1.2 Design of Experiments (DOE).....	11
Fase di screening	12
Fase di ottimizzazione	14
I vantaggi del DOE.....	14
1.3 Stampaggio a caldo.....	15
2 Il caso studio	16
2.1 Descrizione del processo	16
2.2 Fattori di input	21
2.3 Definizione dei parametri controllabili e parametri di disturbo	24
2.4 Definizione dei livelli misti (piano fattoriale completo)	26
2.5 Esecuzione delle operazioni.....	28
2.6 Risultati delle simulazioni e valori di output	29
3 Analisi dei risultati	33
3.1 Introduzione.....	33
3.2 Analisi della varianza.....	33
Modello di regressione lineare.....	34
Definizione dei parametri ANOVA.....	34
Definizione dei coefficienti	36

4	Analisi dei risultati nel caso in esame	38
4.1	Definizione dei fattori	38
4.2	Analisi della regressione: ΔT Stampo.....	39
4.3	Analisi della regressione: ΔT Pezzo.....	41
4.4	Analisi della regressione: σ_{\max} stampo	43
4.5	Analisi della regressione: σ_{\max} pezzo	45
5	Analisi dei modelli.....	48
5.1	Introduzione.....	48
5.2	Definizione di Main Effect Plot	48
5.3	Definizione di Interaction Plot	49
5.4	Caso in esame	50
6	Ottimizzazione dei modelli	55
7	Conclusioni	61
7.1	Limiti dell'analisi	62
7.2	Considerazioni finali.....	63
8	Bibliografia	64

Elenco delle figure

Figura 1.1: Esempio di definizione dei livelli per DOE.....	14
Figura 1.2: Primo step dell'Operazione 1.....	17
Figura 1.3: Ultimo step dell'Operazione 1	18
Figura 1.4: Primo step dell'Operazione 2.....	19
Figura 2.1: Tabella descrittiva dell'Operazione 1.....	22
Figura 2.2: Tabella descrittiva dell'Operazione 2.....	23
Figura 2.3: Tabelle descrittive dei parametri controllabili.....	24
Figura 2.4: Tabelle descrittive dei parametri di disturbo.....	25
Figura 2.5: Definizione dei livelli per DOE del caso in esame	28
Figura 2.6: Esempio dell'interfaccia grafica del software QForm VX.....	29
Figura 2.7: Esempio dell'interfaccia grafica di QForm VX per la lettura degli output.....	30
Figura 2.7: Esempio interfaccia acquisizione valori di output su QForm VX	30
Figura 2.8: Tabella dei valori di output per ogni simulazione.....	32
Figura 3.1: Tabella riassuntiva VIF.....	37
Figura 4.1: Tabella riassuntiva dei fattori.....	38
Figura 4.2: Analisi di ΔT sullo stampo.....	40
Figura 4.3: Analisi di ΔT sul pezzo	43
Figura 4.4: Analisi di σ_{max} sullo stampo.....	45
Figura 4.5: Analisi di σ_{max} sul pezzo.....	47
Figura 5.1: Esempio di Main Effect Plot	48
Figura 5.2: Main Effects Plot per σ_{max} pezzo.....	50
Figura 5.3: Interaction Plot per σ_{max} pezzo	51
Figura 5.4: Main Effects Plot per ΔT pezzo.....	51
Figura 5.5: Interaction Plot per ΔT pezzo	52
Figura 5.6: Main Effects Plot per σ_{max} stampo.....	52
Figura 5.7: Interaction Plot per σ_{max} stampo	53
Figura 5.8: Main Effects Plot per ΔT sullo stampo	53
Figura 5.9: Interaction Plot per ΔT sullo stampo	54

Figura 6.1: Ottimizzazione dei modelli per il minimo valore locale di ΔT stampo	56
Figura 6.2: Ottimizzazione dei modelli per il minimo valore locale di ΔT pezzo	57
Figura 6.3: Ottimizzazione dei modelli per il minimo valore locale di σ_{max} stampo	58
Figura 6.4: Ottimizzazione dei modelli per il minimo valore locale di σ_{max} pezzo	59
Figura 6.5: Ottimizzazione dei modelli per il minimo valore locale della combinazione di ΔT stampo e σ_{max} stampo	60

1 Introduzione

1.1 Scopo della tesi

Lo scopo della tesi è quello di verificare i fattori che principalmente influiscono in un processo di forgiatura a caldo di un componente metallico, mediante l'utilizzo dell'analisi degli elementi finiti.

Attraverso l'applicazione della metodologia del Design of Experiments (DOE), è stato possibile condurre tale analisi, come metodo efficace per il miglioramento o l'ottimizzazione della progettazione di un prodotto (in questo caso lo stampo) e dei processi di produzione dello stesso attraverso l'esecuzione di esperimenti. Mediante l'impiego dell'analisi statistica, si è poi riusciti nello scopo di definire le relazioni che esistono tra un set di variabili in ingresso (input) e una o più variabili in uscita (output). L'obiettivo è stato quello di ottenere modelli previsionali che descrivano le correlazioni tra le variabili ed ottenere vantaggi in termini di riduzione delle prove sperimentali, uso più efficace delle risorse e maggiore affidabilità dei processi.

Il caso di studio preso in esame è rappresentato dalla simulazione di stampaggio a caldo di un componente in 2D. Su questo è stata svolta un'analisi per individuare quali sono i principali fattori che possono svolgere un ruolo determinante nella realizzazione del processo di forgiatura a caldo di un componente metallico. Per prima cosa pertanto, è stata realizzata un'impostazione di un piano di esperimenti simulati che ha compreso come fattori controllati l'altezza della billetta dopo la ricalcatura e il coefficiente di attrito ed i seguenti fattori di disturbo: tempo di permanenza del pezzo sullo stampo, volume iniziale del pezzo, temperatura dello stampo. Una prima analisi è stata effettuata attraverso il software QForm VX attraverso il metodo degli elementi finiti (Finite Element Method "FEM"). Successivamente, i risultati ottenuti sono stati analizzati statisticamente con il software Minitab 19 e sono stati individuati i fattori che hanno influenzato maggiormente il processo. Infine, l'intero processo è stato ottimizzato individuando quei valori numerici che apportano un miglioramento nelle realizzazioni delle operazioni.

1.2 Design of Experiments (DOE)

Il Design of Experiments è un metodo valido che consiste nell'adottare un approccio statistico prima della fase di raccolta dati, al contrario di come avviene in molte aziende, in cui vengono utilizzati metodi statistici nella fase di sperimentazione per riassumere dati ed estrarre ulteriori informazioni.

Mediante la DOE è possibile:

- Ridurre i tempi di sviluppo dei processi
- Utilizzare in maniera efficiente le risorse
- Avere maggiore affidabilità durante i processi

Questa tecnica statistica per la progettazione degli esperimenti si è sviluppata negli anni novanta, ma è stata inventata nel 1920 da uno scienziato inglese, R. A. Fisher, come metodo per massimizzare le informazioni che derivano da dati sperimentali. La recente diffusione del DOE è dovuta agli studi di un ingegnere giapponese, Genichi Taguchi, che si è focalizzato di più sull'uso pratico che sulla teoria che deriva da questa tecnica.

La sperimentazione può apportare anche dei vantaggi se pensata non solo come conferma di quanto previsto, ma anche come una potenziale fonte di opportunità di miglioramento con vantaggi non intuibili a priori.

Il metodo di sperimentazione tradizionale si basa sulle seguenti operazioni:

- Si ha uno sviluppo di un'ipotesi teorica
- Si esegue una prova che verifichi tale ipotesi;
- Si analizzano i risultati;
- Si individuano delle eventuali correzioni;
- Si eseguono ulteriori prove.

Il ciclo si conclude quando si raggiunge un risultato che è ritenuto adeguato.

Quando si ha a disposizione delle informazioni teoriche che sono stabili e complete, l'approccio è rapido e soddisfacente.

In un ambiente industriale però, si ha a che fare con fenomeni complessi che impediscono il pieno controllo dei fattori indagati e una conoscenza teorica completa: questo significa che a volte non si è a conoscenza della relazione di causa effetto tra i parametri che influenzano il processo in esame e le variabili di output da ottimizzare.

Il metodo DOE al contrario, consta di due fasi principali:

- Una prima fase di screening che consiste nell'identificare i fattori significativi e la loro correlazione al fine di ridurre il campo di analisi;
- Una fase di ottimizzazione che consiste nell'identificare la risposta, analizzando, sia l'influenza dei fattori che l'influenza dei fattori interazione.

Fase di screening

Nella prima fase si devono effettuare una serie di prove sistematiche al fine di individuare i fattori più significativi e la correlazione tra questi. Pertanto si procede nel modo seguente:

- a) Identificare la risposta che caratterizza il processo;
- b) Identificare i fattori che influiscono sulla risposta;
- c) Per ogni fattore viene stimato il campo di variabilità in relazione al processo di interesse (che consiste nell'individuazione di un valore massimo ed un valore minimo);
- d) Predisporre il piano di prova;
- e) Esecuzione delle prove;
- f) Analisi dei risultati per valutare quali sono i fattori che singolarmente hanno influenza sul processo.

Considerati n fattori ed i valori di massimo e minimo associati, si effettuano poi tanti test in base al numero di combinazioni possibili tra i fattori. Infine si confrontano tra loro gli effetti dei singoli fattori analizzando il peso che ognuno ha sull'intero processo.

Si valutano poi le interazioni tra i fattori, ovvero l'effetto sulla risposta dato dalla combinazione di questi.

A	B	C	D	E
1	1	1	1	1
1	1	1	1	2
1	1	1	2	1
1	1	1	2	2
1	1	2	1	1
1	1	2	1	2
1	1	2	2	1
1	1	2	2	2
1	2	1	1	1
1	2	1	1	2
1	2	1	2	1
1	2	1	2	2
1	2	2	1	1
1	2	2	1	2
1	2	2	2	1
1	2	2	2	2
1	3	1	1	1
1	3	1	1	2
1	3	1	2	1
1	3	1	2	2
1	3	2	1	1

3	3	1	2	2
3	3	2	1	1
3	3	2	1	2
3	3	2	2	1
3	3	2	2	2

Figura 1.1: Esempio di definizione dei livelli per DOE

Fase di ottimizzazione

Nella seconda fase si estrapola una formulazione matematica della risposta del sistema in funzione delle variabili. Il fine è quello di individuare la condizione di ottimo e di valutarne poi la stabilità.

I vantaggi del DOE

I metodi di Design of Experiments sono principalmente applicati in ambienti ingegneristici sia per quanto riguarda l'ambito della progettazione e sia l'ambito di sviluppo dell'ambiente di lavoro. Le potenziali applicazioni includono: l'ottimizzazione del design del prodotto, l'analisi delle configurazioni di base dei progetti, la selezione dei materiali, la selezione delle tolleranze dei componenti e l'ottimizzazione del processo. I vantaggi tipici ottenuti dall'applicazione di tale metodo pertanto sono:

- riduzione dei tempi complessivi di sviluppo del prodotto;
- miglioramento della qualità del prodotto;
- miglioramento della soddisfazione del cliente con il prodotto;
- ridotta la variabile di casualità sia nella realizzazione del prodotto che in quella del processo;
- identificazione delle variabili che maggiormente influenzano il processo;
- riduzione dei costi di sviluppo e di processo;
- ridotta sensibilità del prodotto alle variazioni ambientali e produttive;
- favorisce lo sviluppo di nuovi processi e tecnologie di produzione;
- affidabilità del prodotto e flessibilità di processo migliorate;

1.3 Stampaggio a caldo

Nell'ambito della produzione industriale i processi produttivi che portano alla realizzazione di componenti in materiale metallico sono molteplici. Tra questi figurano i processi per deformazione ed in particolare lo stampaggio a caldo che possono rivestire un ruolo importante nella realizzazione di svariati pezzi.

Lo stampaggio a caldo è uno dei processi di formatura dei metalli più utilizzati nella produzione di parti critiche in varie industrie. Attualmente, è ampiamente utilizzato nella produzione di componenti per automobili e di macchine industriali. Lo stampaggio a caldo, in confronto ai processi di fusione, permette di avere caratteristiche meccaniche e ottenere aspetti superficiali qualitativamente superiori, oltre che avere anche una maggiore efficienza e ripetibilità del processo. Esso inoltre, garantisce minori scarti nel processo di lavorazione meccanica successivo e, in generale, permette di contenere i costi di produzione.

Al giorno d'oggi, i costi di produzione dipendono dal modo in cui la vita utile dello stampo può essere estesa senza alcun tipo di difetti interni ed esterni durante il processo di stampaggio a caldo.

Imprenditori e fornitori sono sempre più sotto pressione per quanto riguarda la riduzione dei costi e la responsabilità per lo sviluppo di nuovi componenti e questi requisiti sono tanto più critici nell'industria automobilistica e nella produzione di macchine industriali. Pertanto è davvero importante trovare delle soluzioni che migliorino le competenze tecniche nei settori dello studio dei materiali e della metallurgia e anche nel settore del design degli utensili.

Strumenti che diventano molto utili sono anche la conoscenza della progettazione assistita da computer (CAD) e della simulazione numerica. Nella forgiatura industriale, i costi degli utensili possono raggiungere circa il 50% del costo di un componente.

Quindi la riduzione del costo dei componenti richiede un'ottimizzazione degli strumenti, in particolare un miglioramento delle prestazioni e della durata. Durante il processo di stampaggio a caldo, gli utensili di forgiatura non sono soggetti solo a sollecitazioni meccaniche, ma anche a sollecitazioni termomeccaniche indotte dal ciclo termico e dalle successive operazioni di forgiatura.

La corretta selezione del materiale dello stampo e della tecnica di fabbricazione dello stampo determina, in larga misura, la vita utile degli stampi di formatura. Potrebbe essere necessario sostituire gli stampi per una serie di motivi, come i cambiamenti nelle dimensioni dovuti all'usura o deformazione plastica, deterioramento della finitura superficiale, discontinuità della lubrificazione o a causa di rotture. I fattori limitanti della vita utile dello stampo possono verificarsi contemporaneamente o separatamente durante il processo di stampaggio a caldo. A causa delle diverse caratteristiche dei

processi o dei prodotti, il processo di stampaggio e quindi la vita dello stampo, possono essere ridotti a causa dall'usura o dalla deformazione plastica.

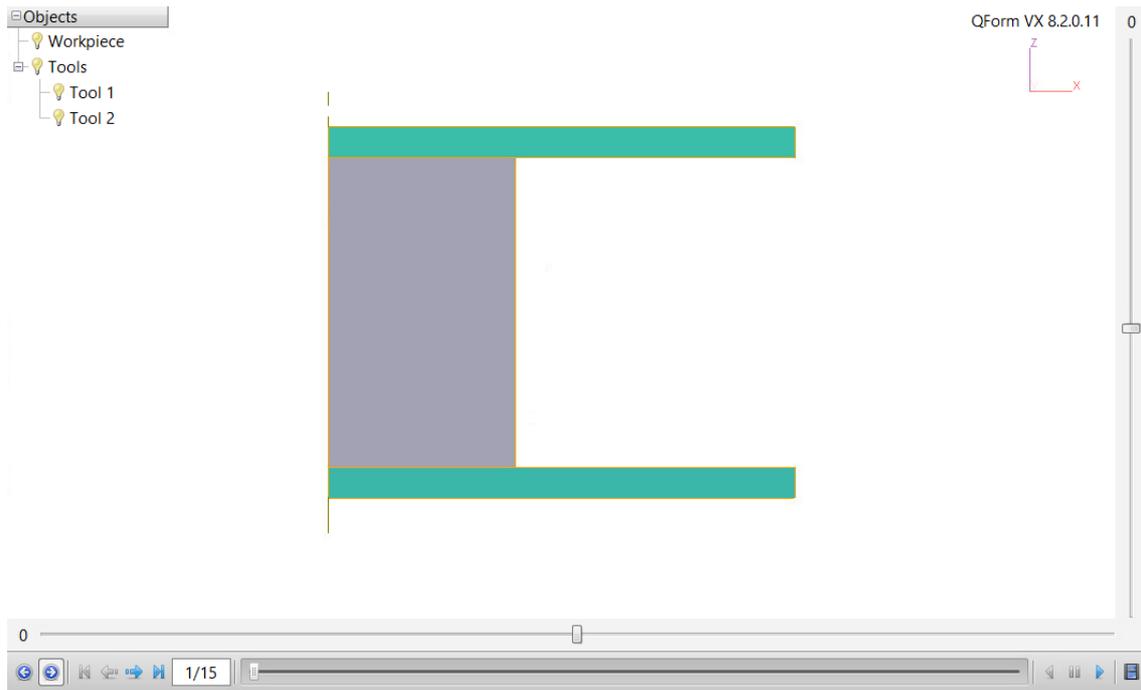
Lo studio per stimare la vita dello stampo nei processi di stampaggio a caldo si basa su due metodi. Il primo è un metodo che permette di prevedere la deformazione plastica di uno stampo, mentre con il secondo è possibile verificare il grado di usura dello stampo. La vita utile dello stampo sarà valutato in base alle variazioni di temperatura iniziale dello stampo ed in base alla velocità del processo di formatura.

2 Il caso studio

2.1 Descrizione del processo

Il processo di stampaggio a caldo del particolare meccanico in esame, avviene secondo due operazioni successive.

La prima operazione (Operazione 1), consiste nel pre-stampaggio del componente caratterizzata da una compressione in stampo chiuso della bielletta iniziale. Questa operazione conferisce una prima forma “schiacciata” al pezzo e viene quasi sempre eseguita nel processo di stampaggio perché permette di ridurre la pressione da impartire alla bielletta con il beneficio di avere un processo più semplice e facilmente controllabile. Non viene applicato per esempio nel caso di stampaggio a caldo di piccoli componenti.



QForm VX 8.2.0.11
Operazione 1

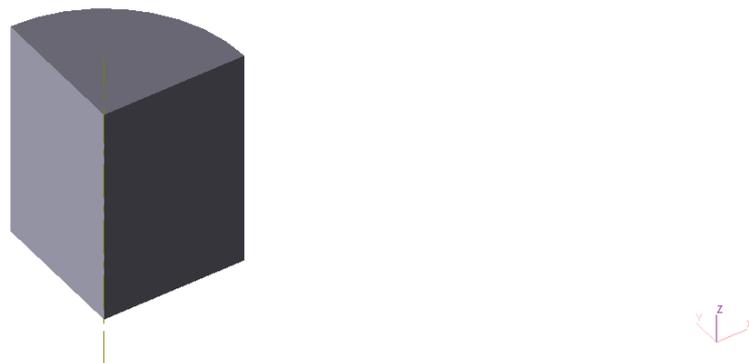


Figura 1.2: Primo step dell'Operazione 1

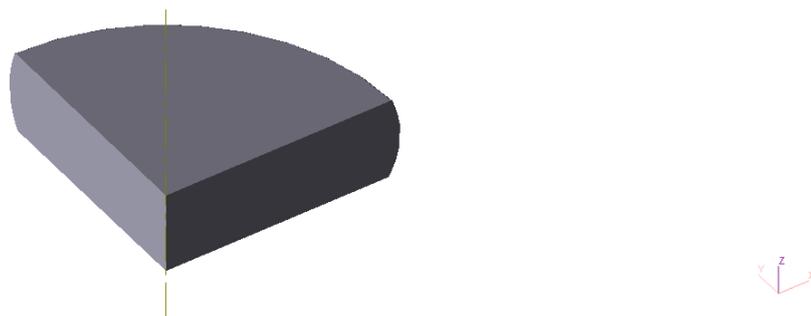
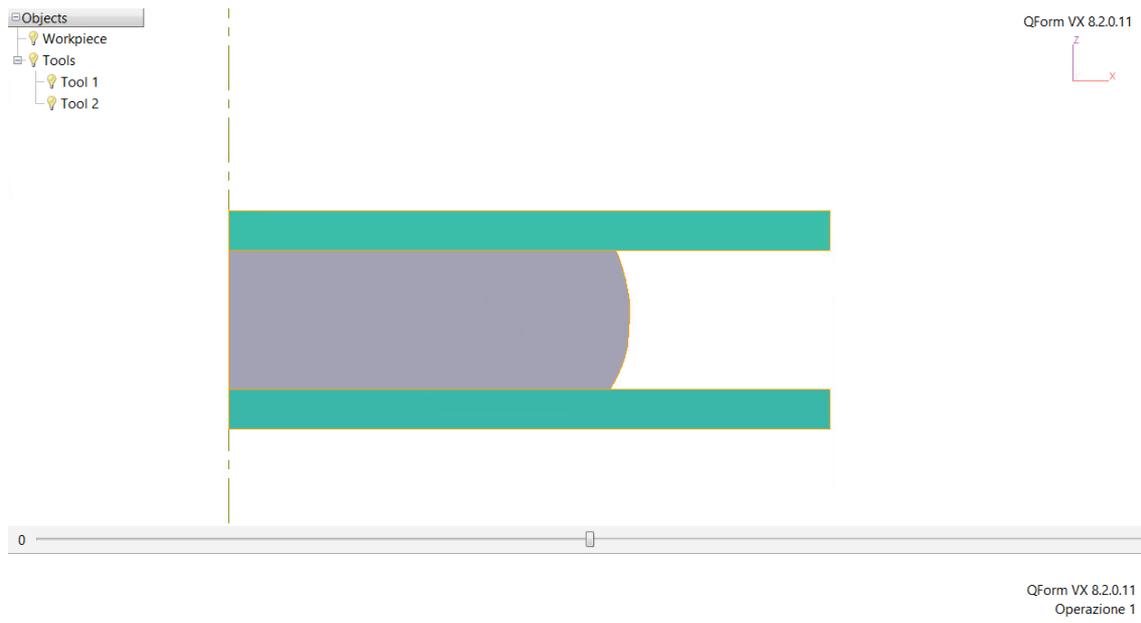
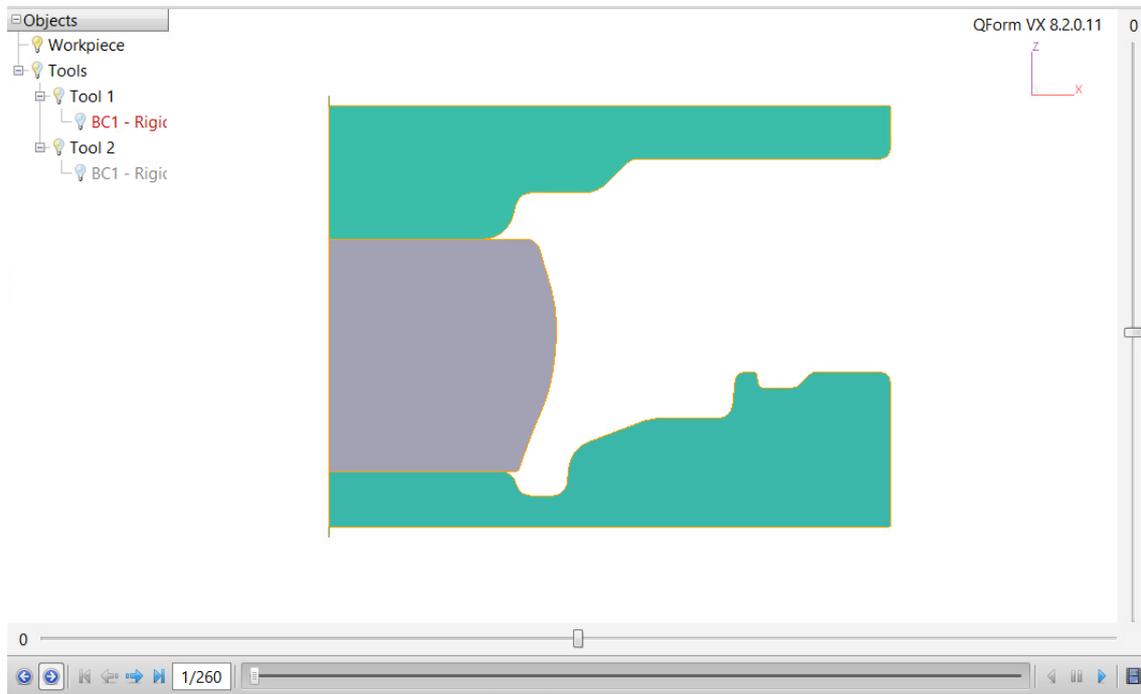


Figura 1.3: Ultimo step dell'Operazione 1

La seconda operazione (Operazione 2) consiste nello stampaggio ovvero nella compressione in stampo chiuso che conferisce al pezzo la sua forma geometrica finale. Prima che il componente venga considerato come un prodotto finito però, potrebbero essere necessarie anche delle lavorazioni di finitura o dei trattamenti termici, a seconda delle richieste del cliente.



QForm VX 8.2.0.11
Operazione 2

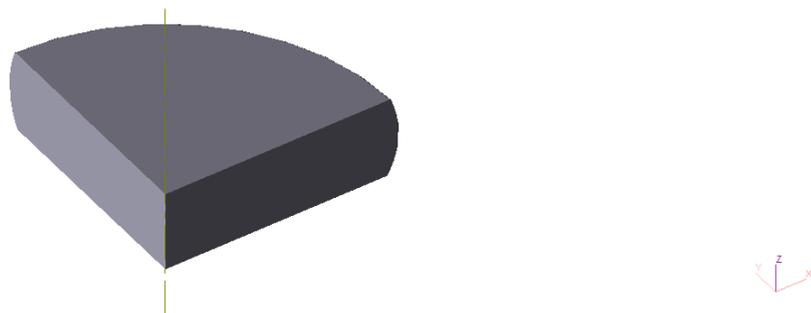
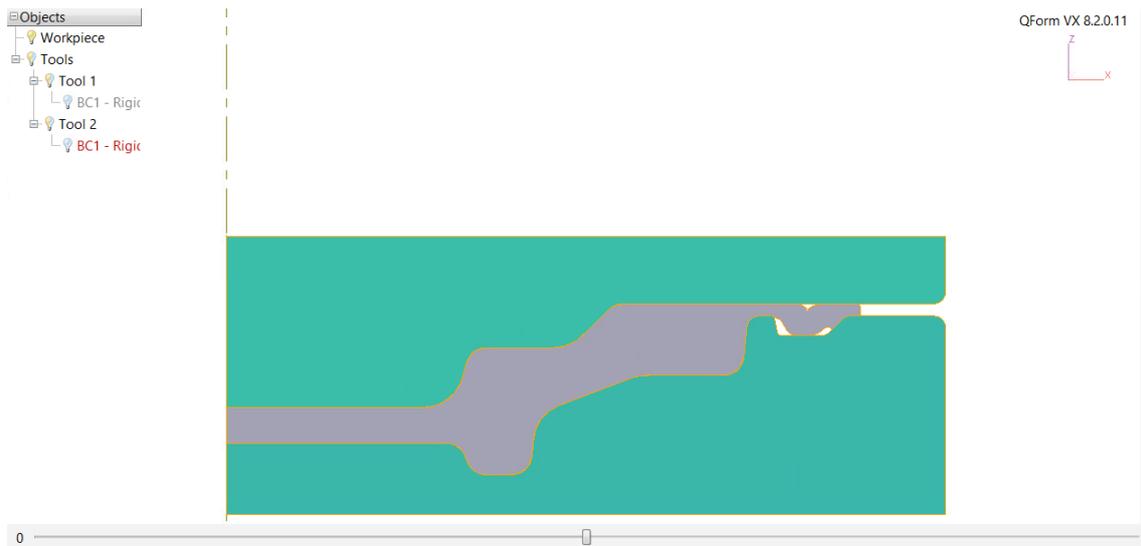


Figura 1.4: Primo step dell'Operazione 2



QForm VX 8.2.0.11
Operazione 2

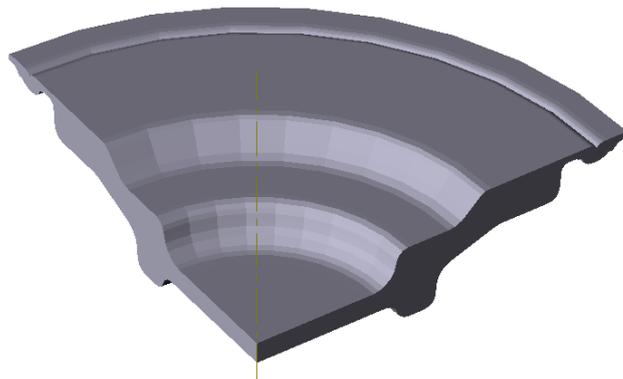


Figura 1.5: *Ultimo step dell'Operazione 2*

2.2 Fattori di input

La programmazione degli esperimenti (DOE), nel caso studio di questa tesi è stata applicata ad un componente in 2D attraverso l'utilizzo del software QForm VX. Un piano sperimentale è stato progettato, analizzando in modo coerente le risorse di calcolo disponibili.

Come primo passo per analizzare il problema della vita degli stampi mediante l'analisi degli elementi finiti si sono identificati tutti i fattori di input che sarebbero potuti essere rilevanti ai fini della realizzazione del processo.

Questi fattori sono stati classificati in due categorie:

- fattori di processo: ovvero tutti quei fattori che possono essere controllati e modificati per la realizzazione del processo industriale;
- fattori di disturbo: ovvero dei parametri non controllabili.

Per lo stampaggio del componente del caso in esame si è indicato come:

- Materiale: il tipo di materiale utilizzato per il pezzo ed il materiale utilizzato per lo stampo superiore ed inferiore. Esso ha una grande influenza sul processo, definendo proprietà di durezza, malleabilità, la duttilità e trattamenti termici che i componenti coinvolti nel processo hanno subito.
Per il pezzo è stato definito il materiale: Steels \ Carbon Steels \ C45 (1-0503)
Per gli stampi (superiore T1 ed inferiore T2) è stato definito il materiale: T1 e T2 - L6 HRC42
- Geometria: la forma del pezzo e dello stampo e la geometria di partenza della billetta che caratterizzano l'andamento del flusso di materiale durante lo stesso stampaggio.
- Canale di bava: in questo fluisce il materiale che verrà scartato prima di ottenere il prodotto finito. La sua geometria inoltre condiziona il flusso del materiale e le tensioni che vengono esercitate dagli stampi.
- Processo: il quale presenta numerosi fattori come:
 - a) la temperatura di stampo e billetta
 - b) la velocità di deformazione,
 - c) il macchinario utilizzato (in questo caso una pressa meccanica da 25MN
 - d) i tempi caratteristici
 - e) le condizioni di arreso (distanza tra i due stampi)
 - f) il tipo di lubrificante utilizzato caratterizzato da un proprio coefficiente di attrito che influenza le forze di scorrimento e di contatto. Il coefficiente di attrito in QForm V8 segue il modello di Levanov

Tutti i parametri e le operazioni descritte precedentemente, sono riportate in maniera schematica nella seguente tabella:

Operazione 1		
Processo	Tipo del processo	Deformazione \ Considera scambio termico
	Tipo del problema	2D
Geometria	Carica da file	Es: Operazione1.crs
Parametri del pezzo	Materiale	Steels \ Carbon Steels \ C45 (1-0503)
	Temperatura	1200°C
Parametri dell'utensile	Equipaggiamento	T1 - Mechanical press 25MN
		T2 - Spinte fisse (Stampo fisso) +OZ
	Lubrificante	T1 - Coefficiente di attrito (Hot forging \ Steels \ Glass-Graphite+water-Unlubricated)
		T2 - Coefficiente di attrito (Hot forging \ Steels \ Glass-Graphite+water-Unlubricated)
	Materiale	T1 e T2 - L6 HRC42
	Temperatura	T1 e T2 - 150/250°C
	Deformazione congiunta	No
	Scambio termico con pezzo	Semplice
Condizioni d'arresto	Distanza	35/55/75 mm tra T1 e T2
Condizioni del contorno	Ambiente	Aria 20°C
Colpi	Numero dei colpi	1 (Energia del colpo 100%)
	Raffreddamento in aria	0 sec.
	Raffreddamento in stampi	2/60 sec.
Parametri di simulazione		Default (Volume cost/non cost)

Figura 2.1: Tabella descrittiva dell'Operazione 1

Operazione 2		
Processo	Tipo del processo	Deformazione \ Considera scambio termico
	Tipo del problema	2D
Geometria	Carica da file	Operazione2.crs
Parametri del pezzo	Materiale	Prendi dall'operazione precedente
	Temperatura	Prendi dall'operazione precedente
Parametri dell'utensile	Equipaggiamento	T1 - Mechanical press 25MN
		T2 - Spinte fisse (Stampo fisso) +OZ
	Lubrificante	T1 - Coefficiente di attrito (Hot forging \ Steels \ Glass-Graphite+water-Unlubricated)
		T2 - Coefficiente di attrito (Hot forging \ Steels \ Glass-Graphite+water-Unlubricated)
	Materiale	T1 e T2 - L6 HRC42
	Temperatura	T1 e T2 - 150/250°C
	Deformazione congiunta	No
	Scambio termico con pezzo	Semplice
Condizioni d'arresto	Distanza	3 mm tra T1 e T2
Condizioni del contorno	Ambiente	Aria 20°C
Colpi	Numero dei colpi	1 (Energia del colpo 100%)
	Raffreddamento in aria	0 sec.
	Raffreddamento in stampi	2/60 sec.
Parametri di simulazione		Default (Volume cost/non cost)

Figura 2.2: Tabella descrittiva dell'Operazione 2

2.3 Definizione dei parametri controllabili e parametri di disturbo

Analizzando il caso di studio e identificati tutti i fattori di input che sono rilevanti ai fini della realizzazione del processo, sono stati definiti i seguenti parametri di progetto (ovvero che possono essere controllati e modificati per la realizzazione del processo industriale):

- Altezza billetta dopo ricalcatura
- Coefficiente di attrito

I valori di minimo e massimo dei parametri con le rispettive unità di misura, sono riportati schematicamente di seguito:

				h_min	h_med	h_max
Altezza billetta dopo ricalcatura			[mm]	35	55	75

		Vetro	Grafite+acqua	Non lubrificato
Coefficiente di attrito (nel modello di Levanov)	[m]	0,15	0,40	0,80

Figura 2.3: Tabelle descrittive dei parametri controllabili

Per lo stampaggio a caldo del componente, sono stati poi scelti i seguenti fattori di disturbo (ovvero quei parametri che non sono controllabili durante il processo di stampaggio a caldo):

- Tempo di permanenza del pezzo sullo stampo
- Volume iniziale del pezzo
- Temperatura dello stampo

I valori di minimo e massimo dei parametri con le rispettive unità di misura, sono riportati schematicamente di seguito:

		t_min	t_max
Tempo di permanenza del pezzo sullo stampo	[s]	2	30

		min	max
Volume iniziale del pezzo facendo variare l'altezza tra	[mm]	95	100

		T0_min	T0_max
Temperatura dello stampo	[°C]	150	250

Figura 2.4: Tabelle descrittive dei parametri di disturbo

2.4 Definizione dei livelli misti (piano fattoriale completo)

La definizione dei livelli è stata effettuata considerando tutti i fattori a disposizione. Conducendo infatti esperimenti con più fattori, si è visto come questi variano congiuntamente anziché essere valutati uno alla volta.

In generale si può affermare che quando tutti i fattori vengono indagati con un ugual numero di livelli, si parla di una famiglia di piani fattoriali con L livelli e k fattori, L^k , dove L^k è anche il numero di prove richieste per caratterizzare in maniera completa il processo. Si parla pertanto di piano fattoriale completo perché sono state usate tutte le possibili combinazioni dei livelli dei fattori (full factorial).

Nel caso in esame $L = 2$, $k = 3$ per i fattori controllabili ovvero quelli di progetto, mentre $L = 3$ e $k = 2$ per quelli di disturbo.

Il piano fattoriale misto e completo è definito pertanto secondo $2^3 * 3^2$ (72) esperimenti e può essere rappresentato schematicamente nel seguente modo:

Test	Fattori controllati		Fattori di disturbo		
	h [mm]	Attrito	t pezzo sullo stampo [s]	V0	T stampo [°C]
1	35	0,15	2	95	150
2	35	0,15	2	95	250
3	35	0,15	2	100	150
4	35	0,15	2	100	250
5	35	0,15	30	95	150
6	35	0,15	30	95	250
7	35	0,15	30	100	150
8	35	0,15	30	100	250
9	35	0,40	2	95	150
10	35	0,40	2	95	250
11	35	0,40	2	100	150
12	35	0,40	2	100	250
13	35	0,40	30	95	150
14	35	0,40	30	95	250
15	35	0,40	30	100	150
16	35	0,40	30	100	250
17	35	0,80	2	95	150
18	35	0,80	2	95	250
19	35	0,80	2	100	150
20	35	0,80	2	100	250
21	35	0,80	30	95	150

22	35	0,80	30	95	250
23	35	0,80	30	100	150
24	35	0,80	30	100	250
25	55	0,15	2	95	150
26	55	0,15	2	95	250
27	55	0,15	2	100	150
28	55	0,15	2	100	250
29	55	0,15	30	95	150
30	55	0,15	30	95	250
31	55	0,15	30	100	150
32	55	0,15	30	100	250
33	55	0,40	2	95	150
34	55	0,40	2	95	250
35	55	0,40	2	100	150
36	55	0,40	2	100	250
37	55	0,40	30	95	150
38	55	0,40	30	95	250
39	55	0,40	30	100	150
40	55	0,40	30	100	250
41	55	0,80	2	95	150
42	55	0,80	2	95	250
43	55	0,80	2	100	150
44	55	0,80	2	100	250
45	55	0,80	30	95	150
46	55	0,80	30	95	250
47	55	0,80	30	100	150
48	55	0,80	30	100	250
49	75	0,15	2	95	150
50	75	0,15	2	95	250
51	75	0,15	2	100	150
52	75	0,15	2	100	250
53	75	0,15	30	95	150
54	75	0,15	30	95	250
55	75	0,15	30	100	150
56	75	0,15	30	100	250
57	75	0,40	2	95	150
58	75	0,40	2	95	250
59	75	0,40	2	100	150
60	75	0,40	2	100	250
61	75	0,40	30	95	150
62	75	0,40	30	95	250
63	75	0,40	30	100	150
64	75	0,40	30	100	250
65	75	0,80	2	95	150
66	75	0,80	2	95	250

67	75	0,80	2	100	150
68	75	0,80	2	100	250
69	75	0,80	30	95	150
70	75	0,80	30	95	250
71	75	0,80	30	100	150
72	75	0,80	30	100	250

Figura 2.5: Definizione dei livelli per DOE del caso in esame

2.5 Esecuzione delle operazioni

Lo step successivo è stato quello di esecuzione delle operazioni utilizzando il software QForm VX a partire dai dati di input delle operazioni, per ricavare successivamente i valori di output.

Quindi, ad ogni operazione sono stati fatti variare i valori di input di altezza billetta dopo ricalcatura, coefficiente di attrito, tempo di permanenza del pezzo sullo stampo, volume iniziale del pezzo, temperatura dello stampo seguendo la tabella riportata nel capitolo precedente.

Al variare dei fattori di input, sono stati poi ottenuti a seguito del completamento delle rispettive simulazioni, i seguenti valori di output: tensione massima sul pezzo e sullo stampo e lo sbalzo termico della temperatura sul pezzo sbalzo e sullo stampo.

Gli stampi e la billetta iniziale di altezza pari a 95mm sono stati forniti dal docente e successivamente sono stati importati su Qform VX, mentre per la simulazione sono stati impostati tutti i parametri manualmente. L'altezza della billetta è stata poi modificata per essere portata a 100mm utilizzando la funzione di "2D Geometry Editor QDraft" presente all'interno dello stesso software per sostituire la billetta con altezza pari a 95mm.

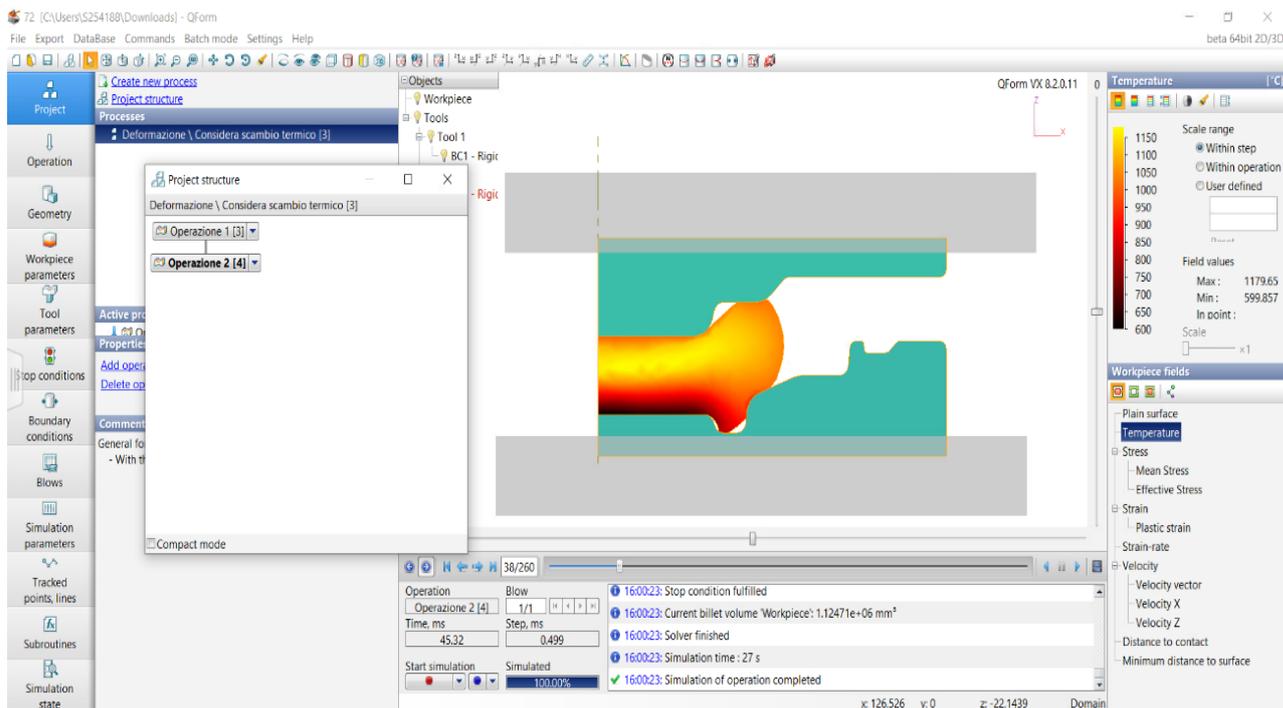


Figura 2.6: Esempio dell'interfaccia grafica del software QForm VX

2.6 Risultati delle simulazioni e valori di output

Come accennato anche nel capitolo precedente, i parametri di output che sono stati valutati al termine di ciascuna simulazione sono stati i seguenti:

- tensione massima sul pezzo
- tensione massima sullo stampo
- sbalzo termico della temperatura sul pezzo
- sbalzo termico della temperatura sullo stampo

Mediante l'analisi FEM, sono stati estrapolati i parametri di interesse ed attraverso tale analisi si è ottenuta una descrizione esaustiva degli andamenti delle principali variabili. Le distribuzioni di tensioni e temperatura per esempio, sono visualizzabili anche graficamente su di una scala colorata che riporta una legenda inerente con le rispettive unità di misura. La lettura dei dati è risultata quindi intuitiva anche per quanto riguarda la lettura dei valori di minimo e massimo dei parametri di output.

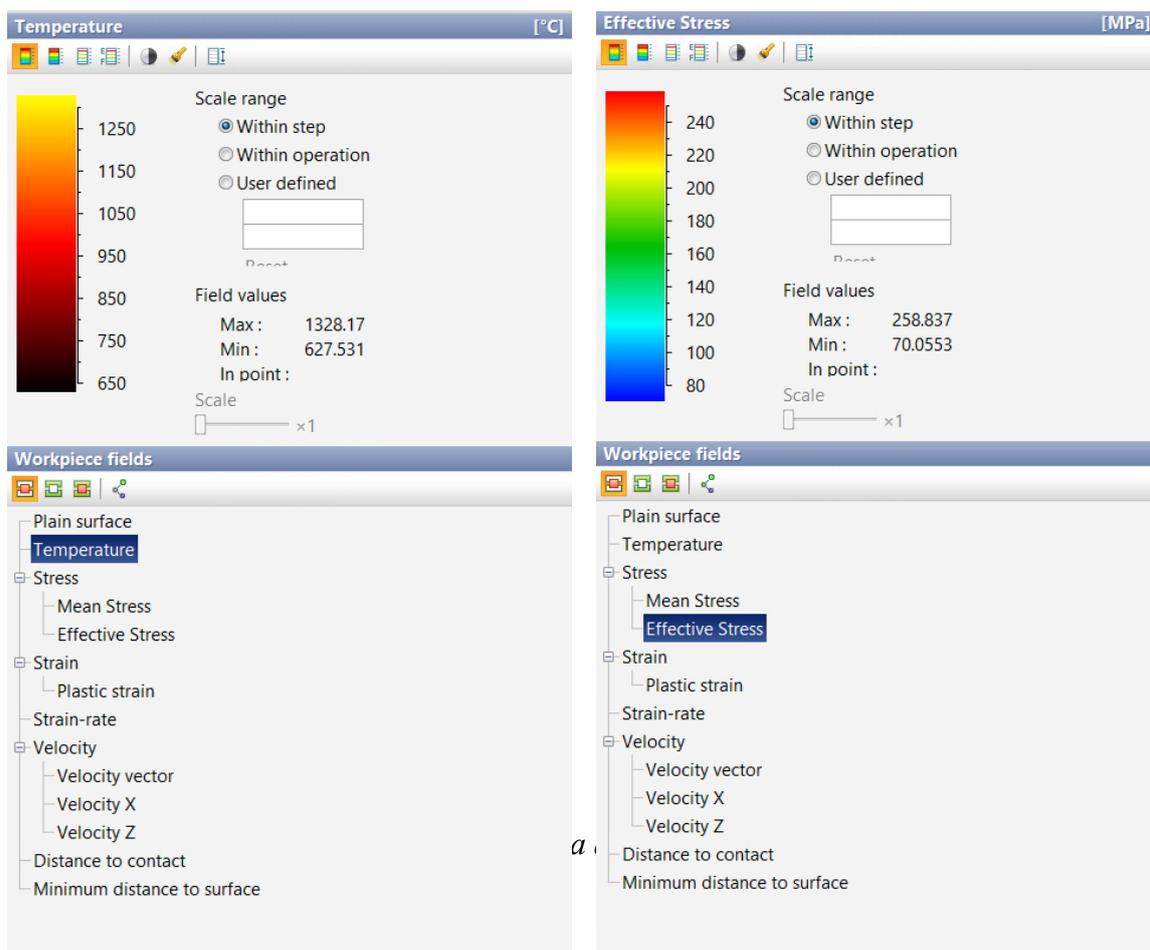


Figura 2.7: Esempio interfaccia acquisizione valori di output su QForm VX

Non essendo il software QForm VX dotato di una funzione per importare automaticamente i valori di output su di un file di elaborazione dati, questi sono stati successivamente importati manualmente su Excel e Minitab 19 per essere analizzati.

I risultati di ottenuti di tensione massima sul pezzo e sullo stampo e lo sbalzo termico della temperatura sul pezzo sbalzo e sullo stampo, sono rappresentati schematicamente di seguito per le 72 simulazioni svolte:

	T min Stampo	T max Stampo	T min Pezzo	T max Pezzo	ΔT Stampo	ΔT Pezzo	σ max Stampo	σ max Pezzo
Test	°C						Mpa	
1	150,000	485,979	1021,280	1289,680	335,979	268,400	1314,580	144,827
2	250,000	554,967	1051,520	1285,180	304,967	233,660	1309,850	148,086
3	150,000	485,057	1032,690	1307,200	335,057	274,510	1307,960	143,048
4	250,000	555,767	1060,110	1312,940	305,767	252,830	1322,290	146,326
5	150,000	463,313	960,311	1156,370	313,313	196,059	1321,190	184,556
6	250,000	532,024	964,684	1151,210	282,024	186,526	1313,950	177,322
7	150,000	464,320	948,993	1183,410	314,320	234,417	1560,570	177,658
8	250,000	533,772	981,018	1182,190	283,772	201,172	1507,940	189,909
9	150,000	618,650	943,178	1287,870	468,650	344,692	1319,800	143,919
10	250,000	674,292	970,081	1289,540	424,292	319,459	1319,500	143,454
11	150,000	624,884	955,981	1333,670	474,884	377,689	1327,330	184,206
12	250,000	683,203	995,106	1318,040	433,203	322,934	1733,490	144,817
13	150,000	585,207	851,456	1154,600	435,207	303,144	1320,880	185,555
14	250,000	646,285	898,710	1155,890	396,285	257,180	1335,020	176,281
15	150,000	590,386	875,772	1249,380	440,386	373,608	1698,120	182,765
16	250,000	649,089	907,040	1219,480	399,089	312,440	1636,140	172,512
17	150,000	753,374	859,441	1292,960	603,374	433,519	1346,120	138,012
18	250,000	784,494	865,746	1297,720	534,494	431,974	1537,920	137,933
19	150,000	722,310	816,448	1380,670	572,310	564,222	1867,020	161,347
20	250,000	764,416	837,850	1403,470	514,416	565,620	1900,080	152,594
21	150,000	700,379	760,565	1193,690	550,379	433,125	1575,270	177,255
22	250,000	753,249	806,124	1200,780	503,249	394,656	1574,430	166,326
23	150,000	711,946	783,249	1350,150	561,946	566,901	2217,410	240,107
24	250,000	757,801	817,881	1382,960	507,801	565,079	2017,160	187,456
25	150,000	488,394	982,791	1278,560	338,394	295,769	1302,790	135,701
26	250,000	557,213	973,259	1284,770	307,213	311,511	1306,460	138,503
27	150,000	495,478	943,374	1311,470	345,478	368,096	1533,490	148,039
28	250,000	563,764	954,518	1311,990	313,764	357,472	1554,030	153,923
29	150,000	435,432	819,673	1185,640	285,432	365,967	1479,980	204,875
30	250,000	505,855	858,751	1185,460	255,855	326,709	1318,690	186,382
31	150,000	434,237	821,052	1197,790	284,237	376,738	1447,420	207,773
32	250,000	504,908	859,901	1196,020	254,908	336,119	1562,350	172,704
33	150,000	576,065	878,432	1293,090	426,065	414,658	1480,020	161,447
34	250,000	637,442	908,718	1291,980	387,442	383,262	1471,050	148,697
35	150,000	628,010	846,040	1312,030	478,010	465,990	1537,160	174,880
36	250,000	678,823	889,619	1314,440	428,823	424,821	1568,970	147,369
37	150,000	560,240	682,994	1178,820	410,240	495,826	1553,380	243,388

38	250,000	616,527	721,175	1178,690	366,527	457,515	1319,840	207,347
39	150,000	558,844	677,186	1230,750	408,844	553,564	1784,890	247,742
40	250,000	615,663	735,955	1266,780	365,663	530,825	1699,450	216,185
41	150,000	684,509	780,869	1292,260	534,509	511,391	1604,030	164,322
42	250,000	732,706	834,119	1291,930	482,706	457,811	1599,410	157,057
43	150,000	681,632	804,446	1396,700	531,632	592,254	2183,360	173,563
44	250,000	733,621	843,352	1391,940	483,621	548,588	2023,190	168,820
45	150,000	678,693	555,498	1188,870	528,693	633,372	1537,790	229,911
46	250,000	729,008	624,979	1208,020	479,008	583,041	1657,980	260,424
47	150,000	682,883	574,278	1335,120	532,883	760,842	2227,100	252,467
48	250,000	730,614	640,627	1336,690	480,614	696,063	2265,330	255,006
49	150,000	491,433	982,774	1287,510	341,433	304,736	1306,440	154,345
50	250,000	560,245	998,452	1282,160	310,245	283,708	1305,740	142,345
51	150,000	489,792	924,633	1312,770	339,792	388,137	1317,280	148,948
52	250,000	558,070	953,222	1308,130	308,070	354,908	1310,810	143,075
53	150,000	452,002	799,961	1214,900	302,002	414,939	1315,260	205,044
54	250,000	519,251	830,357	1217,220	269,251	386,863	1313,810	194,579
55	150,000	454,591	793,735	1211,360	304,591	417,625	1586,120	226,158
56	250,000	519,983	853,423	1217,790	269,983	364,367	1319,130	200,377
57	150,000	597,577	864,822	1295,250	447,577	430,428	1319,230	155,768
58	250,000	656,326	918,995	1294,220	406,326	375,225	1315,650	150,667
59	150,000	594,841	887,314	1315,060	444,841	427,746	1551,960	154,037
60	250,000	654,086	902,985	1354,750	404,086	451,765	1646,120	150,131
61	150,000	577,077	670,109	1212,880	427,077	542,771	1535,460	242,863
62	250,000	632,718	715,386	1213,120	382,718	497,734	1339,480	218,390
63	150,000	578,050	674,363	1237,700	428,050	563,337	1658,970	243,849
64	250,000	634,432	711,494	1259,750	384,432	548,256	1796,870	230,078
65	150,000	703,188	778,095	1291,740	553,188	513,645	1573,760	168,162
66	250,000	748,735	819,514	1302,500	498,735	482,986	1456,010	146,529
67	150,000	700,891	796,643	1396,710	550,891	600,067	2059,820	188,335
68	250,000	749,326	836,692	1406,790	499,326	570,098	2012,240	168,830
69	150,000	694,793	533,001	1214,690	544,793	681,689	1568,220	242,550
70	250,000	740,955	626,032	1214,120	490,955	588,088	1996,220	227,254
71	150,000	695,128	564,573	1338,290	545,128	773,717	2272,640	244,802
72	250,000	740,889	627,564	1332,960	490,889	705,396	2176,050	249,697

Figura 2.8: Tabella dei valori di output per ogni simulazione

3 Analisi dei risultati

3.1 Introduzione

L'analisi dei risultati su base statistica è indispensabile per poter valutare quanto i fattori esaminati influenzino il risultato finale. Come riportato precedentemente la peculiarità del DOE è proprio la valutazione degli effetti presi non solo singolarmente, ma anche nelle loro interazioni, analizzando il piano fattoriale completo.

3.2 Analisi della varianza

L'analisi della varianza ANOVA (Analysis of Variance dall'inglese), è una tecnica utilizzata per l'analisi dei dati e consente di verificare ipotesi circa le differenze tra le medie di due o più popolazioni.

L'analisi della varianza può essere definita come una tecnica statistica di tipo parametrico:

- si assume e che i due campioni siano estratti casualmente dalla popolazione e che la variabile di interesse si distribuisca in maniera normale nella popolazione dalla popolazione stessa
- è rilevante la numerosità campionaria
- omogeneità tra le varianze di più campioni

Attraverso l'ANOVA è possibile verificare l'attendibilità dei modelli ricavati a partire dai valori di output ottenuti dalle simulazioni.

Alla base dell'analisi dell'ANOVA vi è l'ipotesi di scomposizione della varianza in due componenti:

- Varianza interna ai gruppi (o "Within")
- Varianza tra i gruppi (anche detta "Between")

Il confronto dell'analisi si basa sul fatto che se la variabilità interna ai gruppi è piuttosto elevata rispetto alla variabilità tra i gruppi, allora è probabile che la differenza tra questi gruppi è soltanto il risultato della variabilità interna.

Le tecniche di analisi di varianza maggiormente note usano variabili di test distribuite come la variabile casuale F (di Fisher-Snedecor).

A seconda del modello poi le diverse tecniche sono suddivise in:

- Una sola causa
- Più di una causa
- Interazione di più cause

Modello di regressione lineare

Si può definire la regressione come un modello che formalizza e risolve il problema di una relazione funzionale tra variabili misurate da un'ipotetica popolazione infinita.

In statistica, la regressione lineare indica un metodo di stima del valore atteso ed è condizionato da una variabile dipendente, dati i valori di altre variabili indipendenti (ad esempio X_1, \dots, X_k)

Quando più variabili contribuiscono a spiegare la variabile dipendente Y , è possibile estendere la regressione lineare multipla a:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i$$

Dove:

- $i = 1, \dots, n$;
- Y_i è il valore i -esimo della variabile dipendente
- X_i sono le osservazioni i -esime osservazioni di ciascuno dei k regressori
- $\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki}$ è detta retta di regressione
- β è il coefficiente angolare
- ε_i è l'errore statistico

Definizione dei parametri ANOVA

Le analisi precedentemente descritte sono state eseguite mediante il software Minitab 19.

Prima di passare alla descrizione del caso in esame è opportuno anche definire i parametri che hanno consentito in maniera agevole, la valutazione dei dati di output ottenuti.

I gradi di libertà totali sono indicati con la sigla DF e indicano la quantità di informazioni dati raccolti. L'analisi utilizza tali informazioni per stimare i valori di parametri di popolazione sconosciuti. Il DF totale è determinato dal numero di osservazioni nel campione ovvero mostra quante informazioni utilizza quel termine e l'aumento della dimensione del campione fornisce maggiori informazioni sulla popolazione.

Adj SS (Adjusted sums of squares) indica la somma dei quadrati, uno strumento statistico che viene utilizzato per identificare la dispersione dei dati e la capacità dei dati di adattarsi al modello nell'analisi di regressione. Matlab fa una distinzione tra Adj SS Term, Adj SS Error, Adj SS Total.

Adj MS (Mean Squared Error, MSE): l'errore quadratico che indica la discrepanza quadratica media tra i valori dei dati che vengono osservati ed i valori dei dati che vengono stimati.

Minitab 19 utilizza la somma dei quadrati e l'errore quadratico medio sia per calcolare il p-value di un dato sia per calcolare l' R^2 .

L'F-value che compare per ogni termine analizzato tramite l'ANOVA e che indica in statistica un test di ipotesi che si basa sulla distribuzione F (Fisher-Snedecor) ed è volto a verificare l'ipotesi che ci sia la stessa varianza tra due popolazioni che seguono distribuzioni normali.

Minitab utilizza il valore F per calcolare il valore p-value, che viene utilizzato per prendere una decisione sulla significatività statistica dei termini e del modello.

Il p-value è una probabilità che misura l'evidenza contro l'ipotesi nulla. Probabilità più basse forniscono prove più forti contro l'ipotesi nulla. Un valore F sufficientemente grande indica che il termine o il modello è significativo.

Il p-value indica la probabilità di ottenere risultati uguali o meno probabili di quelli osservati durante i vari test, supposta vera l'ipotesi nulla ovvero l'affermazione secondo la quale non ci sia differenza o non ci sia relazione tra due fenomeni misurati, oppure associazione tra due gruppi. Si può anche dire quindi che il p-value chiamato anche "valore di probabilità", aiuta a capire se la differenza tra i risultati ipotizzati e quelli osservati sono dovuti alla casualità introdotta dal campionamento, o se questa differenza è statisticamente significativa, cioè se non è possibile giustificarla mediante la casualità dovuta al campionamento.

Ad ogni test effettuato si è fissata un'ipotesi nulla e un valore soglia x (nel caso in esame di 0,05) che indica il livello di significatività del test.

Una volta calcolato il p-value con i dati di output ottenuti, si sono ottenuti due casi:

- 1 $p\text{-value} > x$
- 2 $p\text{-value} \leq x$

Nel caso 1 l'evidenza empirica non permette di rifiutare l'ipotesi nulla.

Nel caso 2 invece i dati osservati sono statisticamente significativi e si ha una evidenza empirica che è decisamente contraria all'ipotesi nulla che va quindi rifiutata

Viene definito come R^2 (o coefficiente di determinazione) una misura della bontà dell'adattamento della regressione lineare stimata ai dati osservati. L' R^2 è un rapporto che varia tra 0 e 1: tanto più il valore è vicino allo 0 tanto meno i risultati sono dipendenti dalla variabile.

Al contrario, un valore che si avvicina all'1 dimostra che i risultati sono maggiormente dipendenti dalla variabile di input. L' R^2 misura quindi la frazione di variabilità delle osservazioni ed in generale, più il suo valore è alto e più hanno validità i risultati ottenuti tramite il modello.

Definizione dei coefficienti

Nel software Minitab 19 viene indicato con il termine “Coef” un coefficiente di regressione che descrive la dimensione e la direzione della relazione tra un termine e la variabile di risposta. I coefficienti sono i numeri che vengono utilizzati per essere moltiplicati nell'equazione di regressione.

Si indica con SE Coef, l'errore standard. Esso rappresenta un indice della variabilità della proporzione. E' definito come la valutazione della deviazione standard dello stimatore e ne indica una misura della sua imprecisione. Più piccolo è l'errore standard, più precisa è la stima. Dividendo il coefficiente per il suo errore standard si calcola un valore di T-value.

Il T-value come accennato precedentemente è il rapporto tra il coefficiente e l'errore standard.

In Minitab 19 si utilizza il valore T-value per calcolare il valore p-value, che viene utilizzato per verificare se il coefficiente è significativamente diverso da 0.

Il VIF (Variance Inflation Factor) indica quanto viene incrementata la varianza di un coefficiente a causa delle correlazioni tra i predittori nel modello.

Il VIF descrive quanta correlazione tra predittori esiste in un'analisi di regressione. Se la correlazione è elevata, possono sorgere problematiche relative all'aumento della

varianza dei coefficienti di regressione e può essere difficile valutare l'impatto individuale che ciascuno dei predittori ha sulla risposta.

VIF	Status of predictor
VIF = 1	Not correlated
$1 < \text{VIF} < 5$	Moderately correlated
VIF > 5	Highly correlated

Figura 3.1: *Tabella riassuntiva VIF*

Un VIF Maggiore di 5 indica che i coefficienti di regressione non sono calcolati correttamente a causa di una multicollinearità elevata.

4 Analisi dei risultati nel caso in esame

4.1 Definizione dei fattori

Prima di analizzare i dati ottenuti attraverso l'utilizzo del software Minitab 19, è opportuno chiarire anche come sono stati definiti i fattori controllabili ed i fattori di disturbo.

Pertanto si definisce:

- h [mm]: altezza della billetta dopo la ricalcatura
- Attrito: coefficiente di attrito nel modello di Levanov
- T pezzo sullo stampo [s]: Tempo di permanenza del pezzo sullo stampo
- V0_cost: volume iniziale del pezzo
- T stampo [°C]: temperatura dello stampo

Il tutto è riportato schematicamente nella seguente tabella:

Factor Information

Factor	Levels Values
h [mm]	3 35; 55; 75
Attrito	3 0,15; 0,40; 0,80
t pezzo sullo stampo [s]	2 2; 30
V0_cost	2 95; 100
T stampo [°C]	2 150; 250

Figura 4.1: Tabella riassuntiva dei fattori

4.2 Analisi della regressione: ΔT Stampo

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	626297	125259	492,60	0,000
Attrito	1	99140	99140	389,88	0,000
T stampo [°C]*T stampo [°C]	1	5932	5932	23,33	0,000
Attrito*Attrito*Attrito	1	6085	6085	23,93	0,000
h [mm]*t pezzo sullo stampo [s]*T stampo [°C]	1	13467	13467	52,96	0,000
Attrito*Attrito*T stampo [°C]	1	1367	1367	5,38	0,024
Error	66	16782	254		
Total	71	643080			

Model Summary

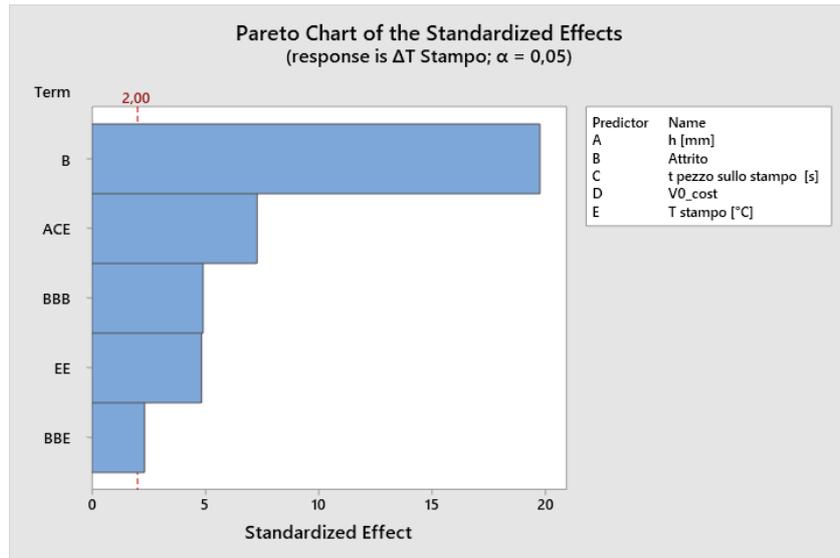
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
15,9462	97,39%	97,19%	96,88%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	267,52	9,13	29,31	0,000	
Attrito	540,0	27,3	19,75	0,000	15,17
T stampo [°C]*T stampo [°C]	-0,000663	0,000137	-4,83	0,000	2,14
Attrito*Attrito*Attrito	-178,4	36,5	-4,89	0,000	19,38
h [mm]*t pezzo sullo stampo [s]*T stampo [°C]	-0,000079	0,000011	-7,28	0,000	1,06
Attrito*Attrito*T stampo [°C]	-0,329	0,142	-2,32	0,024	18,07

Regression Equation

$$\Delta T = 267,52 + 540,0 \text{ Attrito} - 0,000663 \text{ T stampo [°C]*T stampo [°C]} - 178,4 \text{ Attrito*Attrito*Attrito} - 0,000079 \text{ h [mm]*t pezzo sullo stampo [s]*T stampo [°C]} - 0,329 \text{ Attrito*Attrito*T stampo [°C]}$$



Dal Diagramma di Pareto della stima degli effetti per la risposta “ ΔT Stampo”, si può notare chiaramente come lo sbalzo di temperatura sullo stampo sia determinato principalmente dal parametro “B”, ovvero dall’attrito che è un fattore di progetto.

Inoltre si può osservare che l’altezza della billetta dopo ricalcatura (A), il tempo di permanenza del pezzo sullo stampo (C) e la temperatura dello stampo (E) singolarmente sono poco influenti, mentre la loro interazione influenza la variazione della temperatura sullo stampo, seppur in maniera inferiore rispetto all’attrito.

Sia “C” che “E” sono fattori di disturbo.

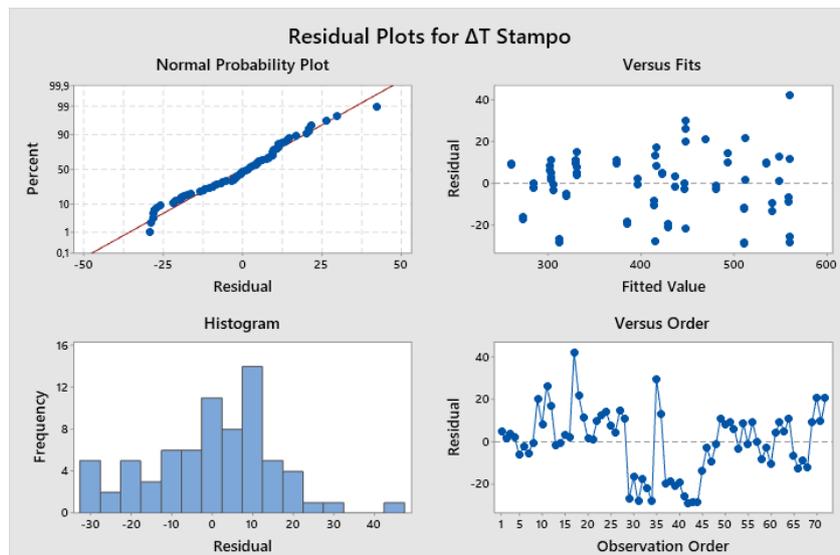


Figura 4.2: Analisi di ΔT sullo stampo

4.3 Analisi della regressione: ΔT Pezzo

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	10	1286112	128611	166,66	0,000
h [mm]	1	70261	70261	91,05	0,000
V0_cost*V0_cost	1	5713	5713	7,40	0,008
h [mm]*Attrito	1	6535	6535	8,47	0,005
h [mm]*T stampo [°C]	1	19674	19674	25,49	0,000
Attrito*t pezzo sullo stampo [s]	1	18874	18874	24,46	0,000
h [mm]*h [mm]*V0_cost	1	42950	42950	55,66	0,000
h [mm]*Attrito*Attrito	1	3616	3616	4,69	0,034
h [mm]*Attrito*t pezzo sullo stampo [s]	1	49427	49427	64,05	0,000
h [mm]*Attrito*V0_cost	1	5576	5576	7,23	0,009
Attrito*V0_cost*V0_cost	1	97925	97925	126,90	0,000
Error	61	47074	772		
Total	71	1333185			

Model Summary

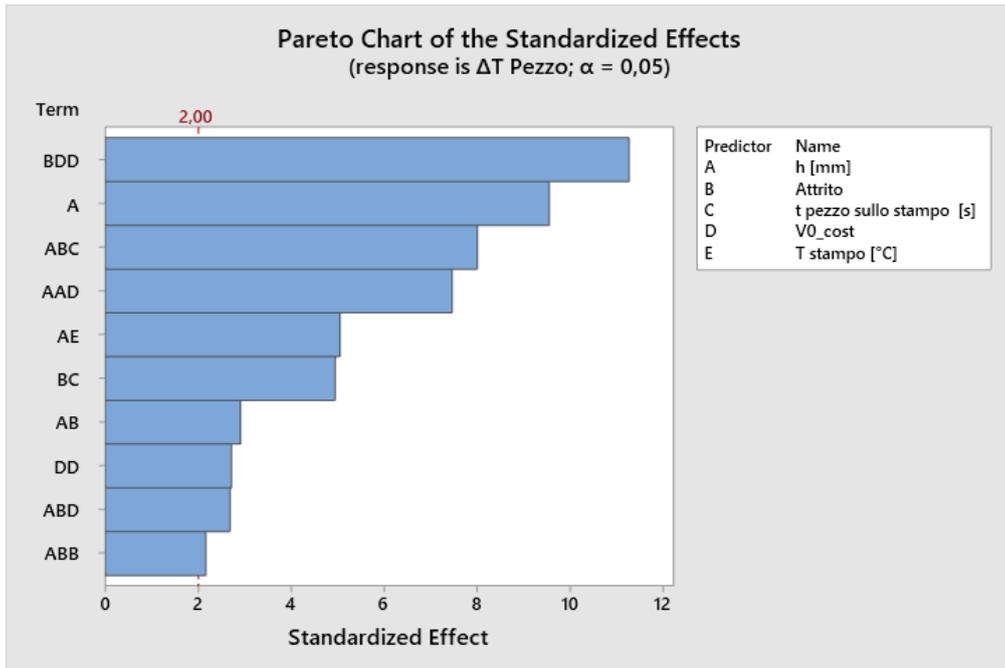
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
27,7795	96,47%	95,89%	94,92%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-606	131	-4,62	0,000	
h [mm]	18,36	1,92	9,54	0,000	92,14
V0_cost*V0_cost	0,0327	0,0120	2,72	0,008	3,20
h [mm]*Attrito	-22,27	7,65	-2,91	0,005	1584,63
h [mm]*T stampo [°C]	-0,00576	0,00114	-5,05	0,000	2,30
Attrito*t pezzo sullo stampo [s]	-7,75	1,57	-4,95	0,000	16,51
h [mm]*h [mm]*V0_cost	-0,001297	0,000174	-7,46	0,000	87,73
h [mm]*Attrito*Attrito	-2,64	1,22	-2,16	0,034	34,88
h [mm]*Attrito*t pezzo sullo stampo [s]	0,2186	0,0273	8,00	0,000	17,48
h [mm]*Attrito*V0_cost	0,2112	0,0786	2,69	0,009	1590,35
Attrito*V0_cost*V0_cost	0,05862	0,00520	11,26	0,000	16,55

Regression Equation

$$\begin{aligned}
 \Delta T \text{ Pezzo} = & -606 + 18,36 \text{ h [mm]} + 0,0327 \text{ V0_cost*V0_cost} \\
 & - 22,27 \text{ h [mm]*Attrito} \\
 & - 0,00576 \text{ h [mm]*T stampo [°C]} \\
 & - 7,75 \text{ Attrito*t pezzo sullo stampo [s]} \\
 & - 0,001297 \text{ h [mm]*h [mm]*V0_cost} \\
 & - 2,64 \text{ h [mm]*Attrito*Attrito} \\
 & + 0,2186 \text{ h [mm]*Attrito*t pezzo sullo stampo [s]} \\
 & + 0,2112 \text{ h [mm]*Attrito*V0_cost} \\
 & + 0,05862 \text{ Attrito*V0_cost*V0_cost}
 \end{aligned}$$



In questo caso, i fattori che influenzano maggiormente lo sbalzo di temperatura del pezzo durante il processo, sono “A” (altezza della billetta dopo la ricalcatura) e l’interazione di “D” (volume iniziale del pezzo), “C” (tempo di permanenza del pezzo sullo stampo), “E” (temperatura iniziale dello stampo) e “B” (coefficiente di attrito). In particolar modo si può notare come l’interazione tra “B” e “D” sia il fattore principale responsabile dell’innalzamento della temperatura nel pezzo. In questo caso sia i parametri controllabili che i fattori di disturbo influiscono sulla risposta.

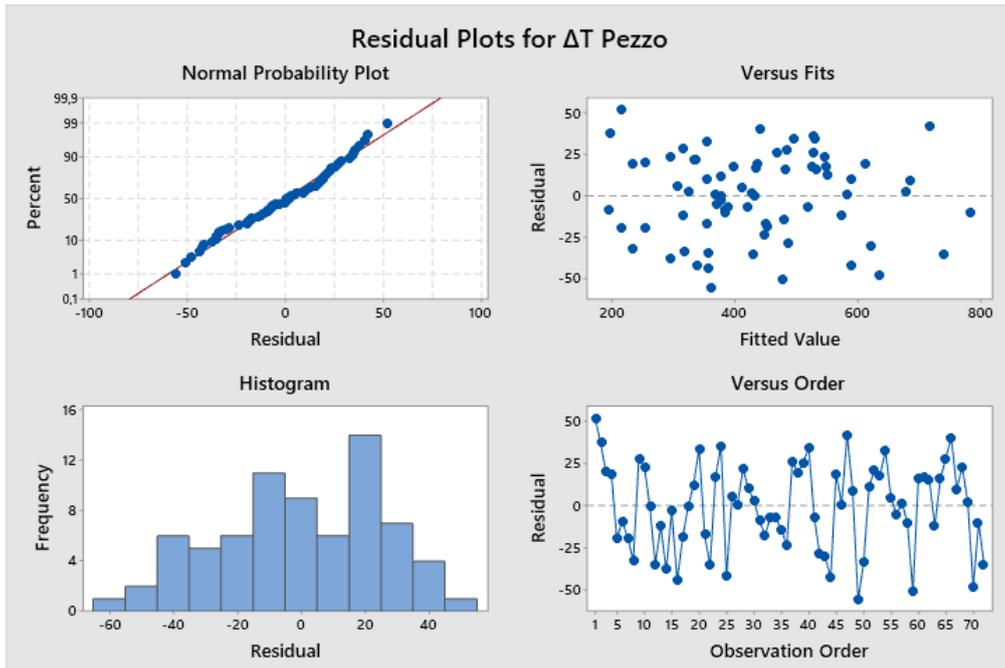


Figura 4.3: Analisi di ΔT sul pezzo

4.4 Analisi della regressione: σ_{\max} stampo

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	5039501	1259875	130,25	0,000
Attrito*V0_cost	1	1704595	1704595	176,22	0,000
h [mm]*Attrito*Attrito	1	41250	41250	4,26	0,043
h [mm]*Attrito*t pezzo sullo stampo [s]	1	208588	208588	21,56	0,000
Attrito*V0_cost*V0_cost	1	1899609	1899609	196,38	0,000
Error	67	648097	9673		
Total	71	5687598			

Model Summary

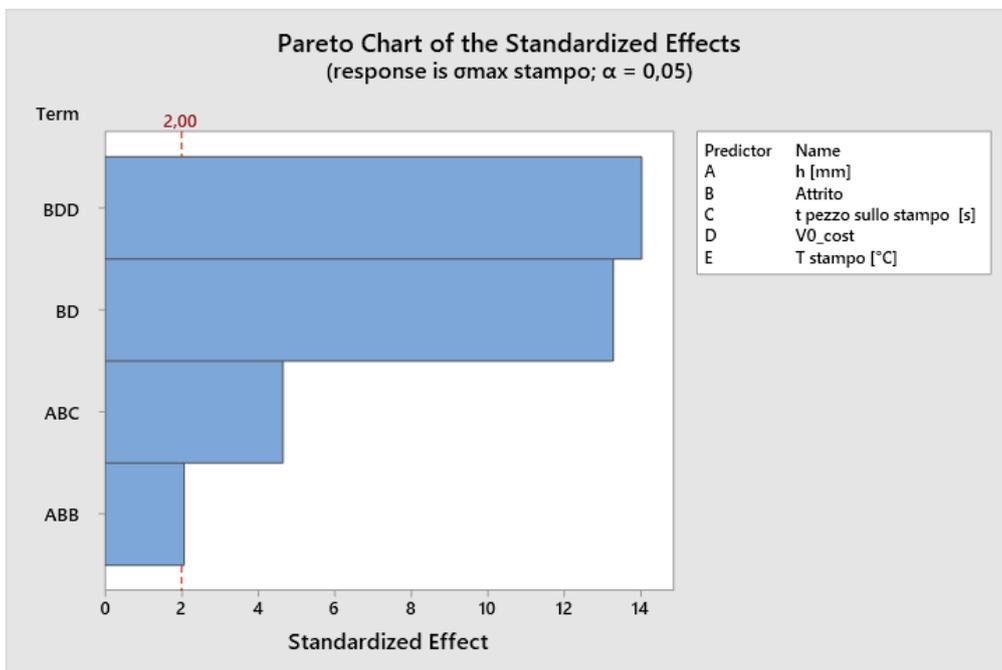
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
98,3519	88,61%	87,92%	86,40%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1290,4	27,8	46,37	0,000	
Attrito*V0_cost	-120,93	9,11	-13,27	0,000	421,85
h [mm]*Attrito*Attrito	3,70	1,79	2,07	0,043	5,99
h [mm]*Attrito*t pezzo sullo stampo [s]	0,1266	0,0273	4,64	0,000	1,39
Attrito*V0_cost*V0_cost	1,2823	0,0915	14,01	0,000	408,24

Regression Equation

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{max stampo}} = & 1290,4 - 120,93 \text{ Attrito} * V0_cost \\
 & + 3,70 \text{ h [mm]} * \text{Attrito} * \text{Attrito} \\
 & + 0,1266 \text{ h [mm]} * \text{Attrito} * t \text{ pezzo sullo stampo [s]} \\
 & + 1,2823 \text{ Attrito} * V0_cost * V0_cost
 \end{aligned}$$



Andando ad analizzare il Diagramma di Pareto per la risposta relativa alla tensione massima sullo stampo, si può notare come “D” ovvero il volume iniziale del pezzo e la “B” ovvero il tipo di lubrificante, influenzino maggiormente i valori di tensione sugli stampi.

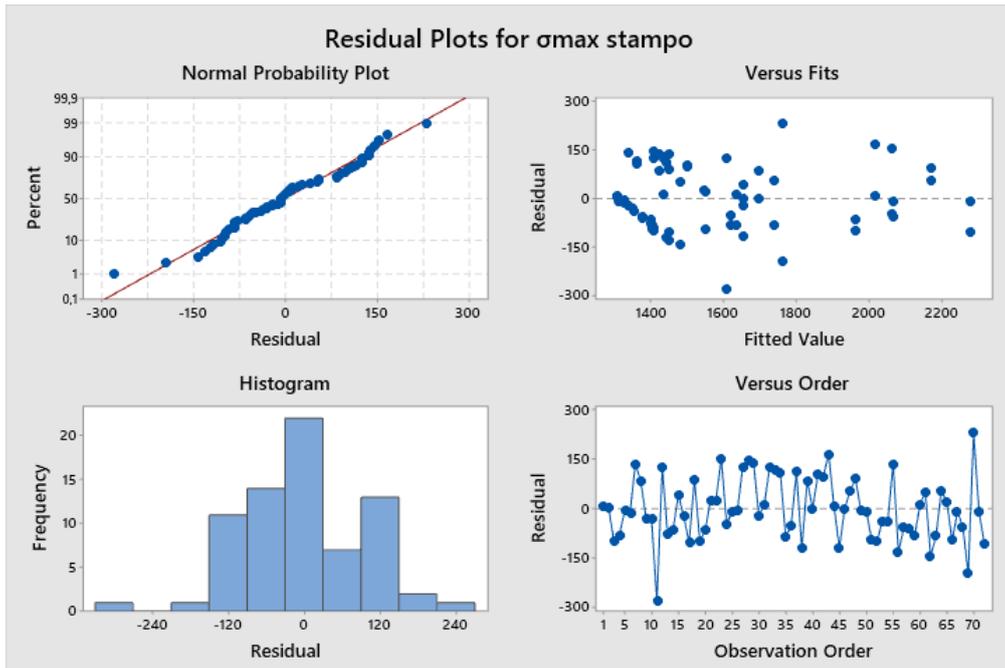


Figura 4.4: Analisi di σ_{max} sullo stampo

4.5 Analisi della regressione: σ_{max} pezzo

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	84566	16913,1	89,60	0,000
Attrito*Attrito	1	1395	1394,7	7,39	0,008
T stampo [°C]*T stampo [°C]	1	2276	2276,3	12,06	0,001
h [mm]*Attrito*t pezzo sullo stampo [s]	1	1328	1327,6	7,03	0,010
h [mm]*t pezzo sullo stampo [s]*V0_cost	1	11456	11456,1	60,69	0,000
Attrito*V0_cost*V0_cost	1	2123	2122,7	11,25	0,001
Error	66	12458	188,8		
Total	71	97024			

Model Summary

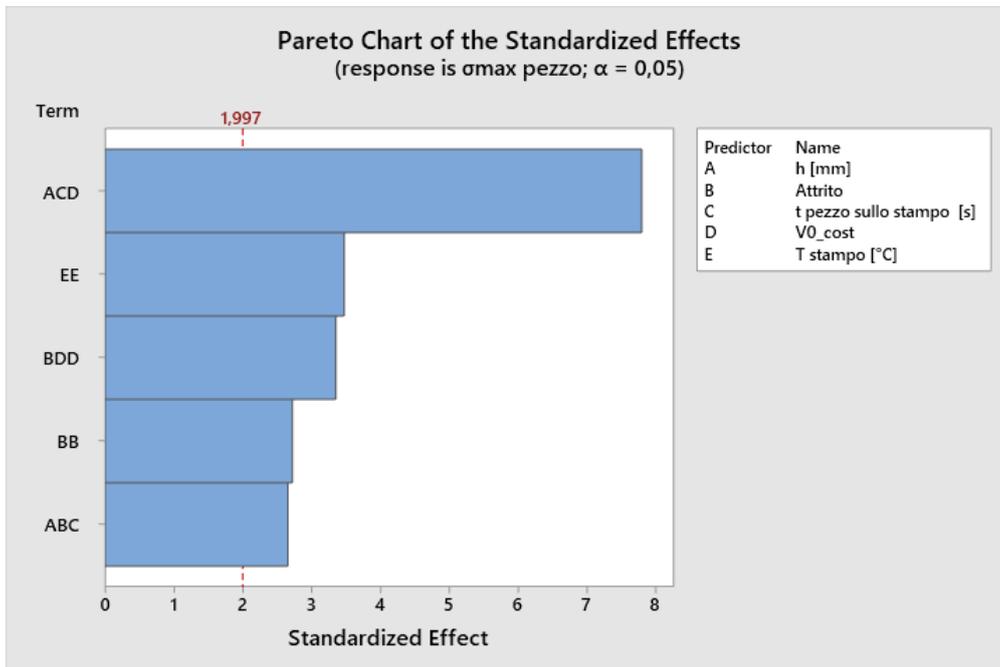
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
13,7390	87,16%	86,19%	84,65%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	139,00	7,33	18,97	0,000	
Attrito*Attrito	-82,5	30,4	-2,72	0,008	24,63
T stampo [°C]*T stampo [°C]	-0,000281	0,000081	-3,47	0,001	1,00
h [mm]*Attrito*t pezzo sullo stampo [s]	0,01882	0,00710	2,65	0,010	4,82
h [mm]*t pezzo sullo stampo [s]*V0_cost	0,000297	0,000038	7,79	0,000	3,77
Attrito*V0_cost*V0_cost	0,01061	0,00316	3,35	0,001	24,99

Regression Equation

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\max} \text{ pezzo} &= 139,00 - 82,5 \text{ Attrito} * \text{Attrito} \\
 &- 0,000281 \text{ T stampo } [^{\circ}\text{C}] * \text{T stampo } [^{\circ}\text{C}] \\
 &+ 0,01882 \text{ h [mm]} * \text{Attrito} * \text{t pezzo sullo stampo [s]} \\
 &+ 0,000297 \text{ h [mm]} * \text{t pezzo sullo stampo [s]} * \text{V0_cost} \\
 &+ 0,01061 \text{ Attrito} * \text{V0_cost} * \text{V0_cost}
 \end{aligned}$$



Infine per quanto riguarda l'analisi della risposta relativa alla tensione massima sul pezzo, si può osservare come questa venga influenzata notevolmente dall'interazione del fattore di progetto "A" (altezza della billetta dopo ricalcatura) con i fattori di disturbo relativi al tempo di permanenza del pezzo sullo stampo "C" e alla temperatura iniziale dello stampo "E".

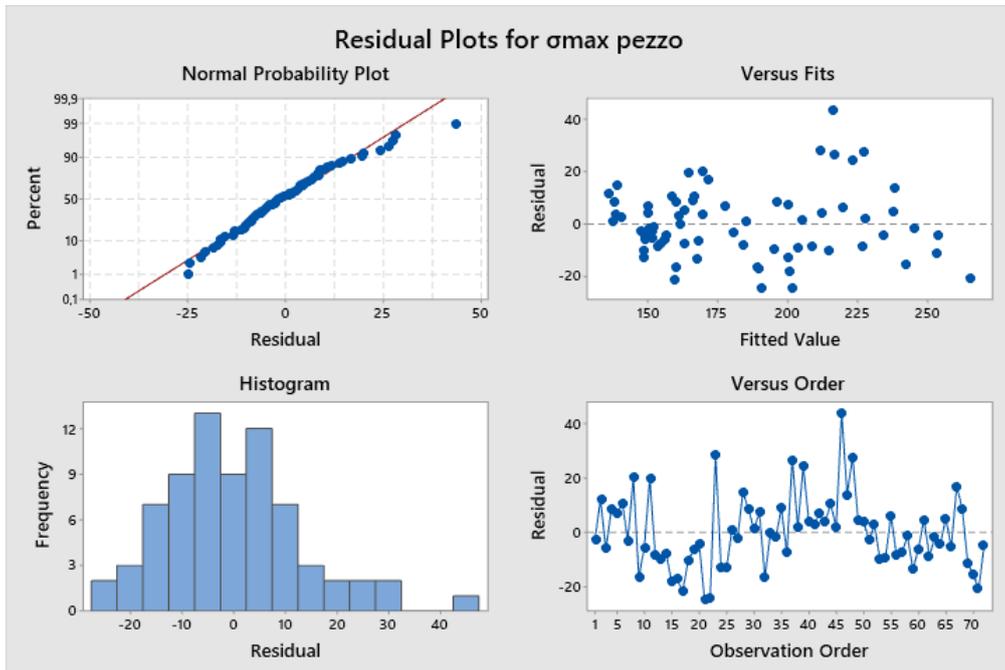


Figura 4.5: Analisi di σ_{max} sul pezzo

5 Analisi dei modelli

5.1 Introduzione

Dal capitolo precedente si può osservare che in tutti e quattro i casi l' R^2 è molto elevato e pertanto il modello rispecchia in maniera assolutamente adeguata i risultati rilevati. Si ha infatti che l' R^2 per il ΔT stampo è pari al 99,96%, per il ΔT pezzo è del 98,26%, per il σ_{max} stampo è pari al 90,75% e per il σ_{max} pezzo è del 92,73%. In questa prima analisi è stato valutato il peso che ogni fattore ha sulla risposta. Mediante la funzione “Factorial Plots” di Minitab 19 poi, è stato possibile analizzare i dati raccolti e mostrati nel capitolo precedente andando a vedere l'influenza (positiva o negativa) di tali effetti sulle rispettive risposte.

5.2 Definizione di Main Effect Plot

Il “Main Effect Plot” è lo strumento grafico più semplice per determinare l'impatto relativo ad una varietà di input, sull'output di interesse. Nel Design Of Experiment o nell'analisi della varianza, il Main Effect Plot mostra il risultato medio per il valore di ciascuna variabile indipendente, combinando gli effetti delle altre variabili. In altre parole, valori medi di risposta a ciascun livello della variabile di processo e viene utilizzato per determinare se l'effetto principale è presente o meno per la variabile categoriale.

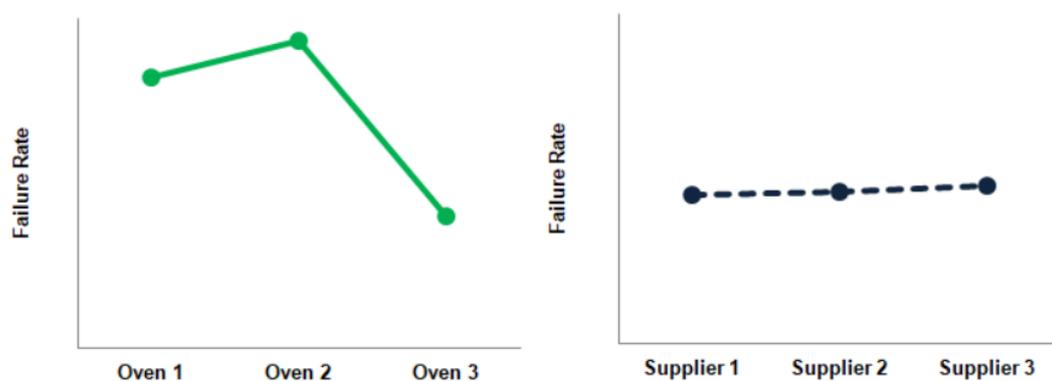


Figura 5.1: Esempio di Main Effect Plot

Nell'analisi dei grafici è possibile distinguere due casi differenti:

- Se la linea è orizzontale, in altre parole, parallela all'asse x, allora non esiste alcun effetto principale. La media della risposta è la stessa per tutti i livelli dei fattori.
- Allo stesso modo, se la linea non è orizzontale, allora esiste l'effetto principale. In altre parole, la media della risposta non è la stessa per tutti i livelli dei fattori. La pendenza determina l'entità dell'effetto principale.

Gli effetti principali sono gli effetti di una variabile indipendente sulla variabile dipendente. Il segno dell'effetto principale mostra la direzione dell'effetto. In altre parole, mostra se il valore medio della risposta aumenta o diminuisce. In generale con il Main Effect Plot possono esserci tre casi:

- Positivo: Aumenta il livello o la manipolazione della variabile indipendente aumenta anche il livello della variabile dipendente.
- Effetto negativo: l'aumento della variabile indipendente diminuisce la variabile dipendente.
- Nessun effetto: nessun aumento o diminuzione della variabile dipendente a seconda della variabile indipendente.

5.3 Definizione di Interaction Plot

Interaction Plots sono ottenuti mantenendo un fattore costante e facendo variare l'altro. Quando le linee si intersecano, si ha interazione tra i fattori, mentre quando queste sono parallele si ha una mancanza di interazione. Inoltre, se le linee sono perpendicolari tra di loro, l'interazione è significativa.

5.4 Caso in esame

Definiti il Main Effect Plot e l'Interaction Plot, vengono riportati di seguito i grafici ottenuti con i dati del caso in esame.

WORKSHEET 1

Factorial Plots for σ_{max} pezzo

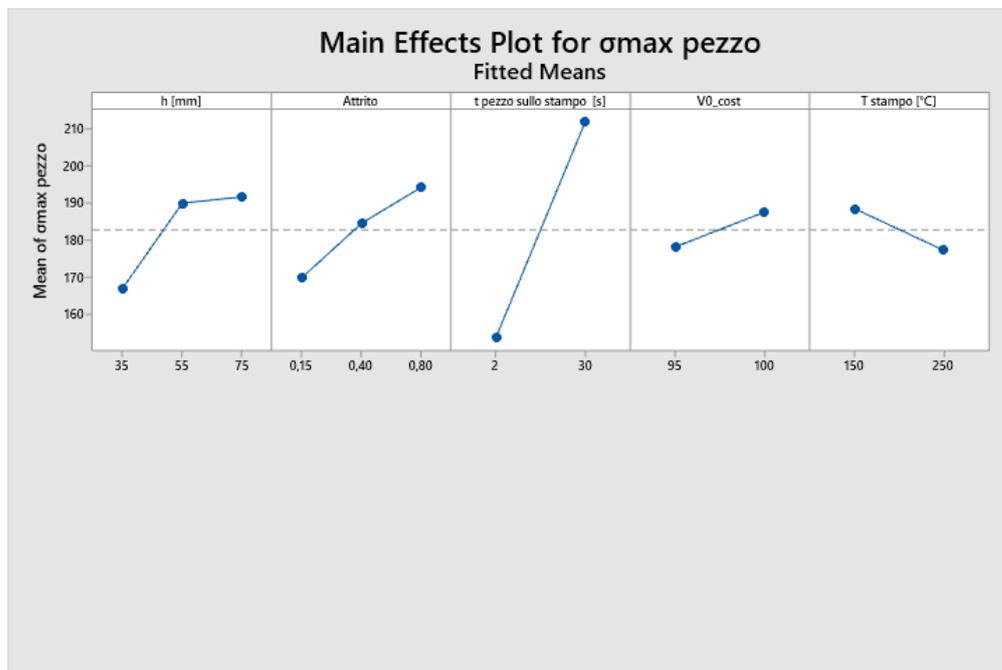


Figura 5.2: Main Effects Plot per σ_{max} pezzo

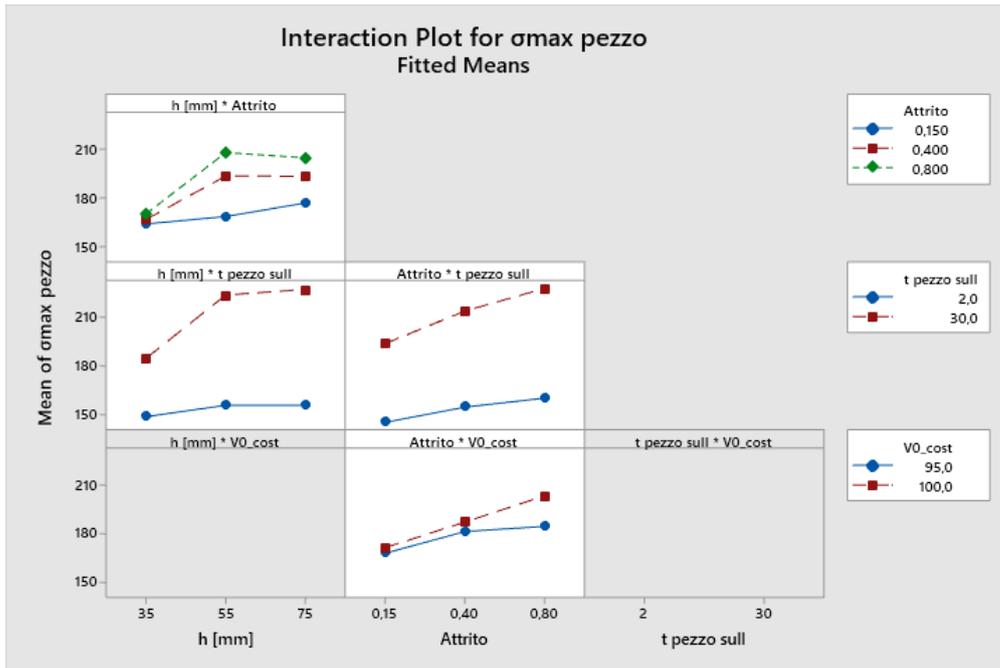


Figura 5.3: Interaction Plot per σ_{max} pezzo

WORKSHEET 1

Factorial Plots for ΔT Pezzo

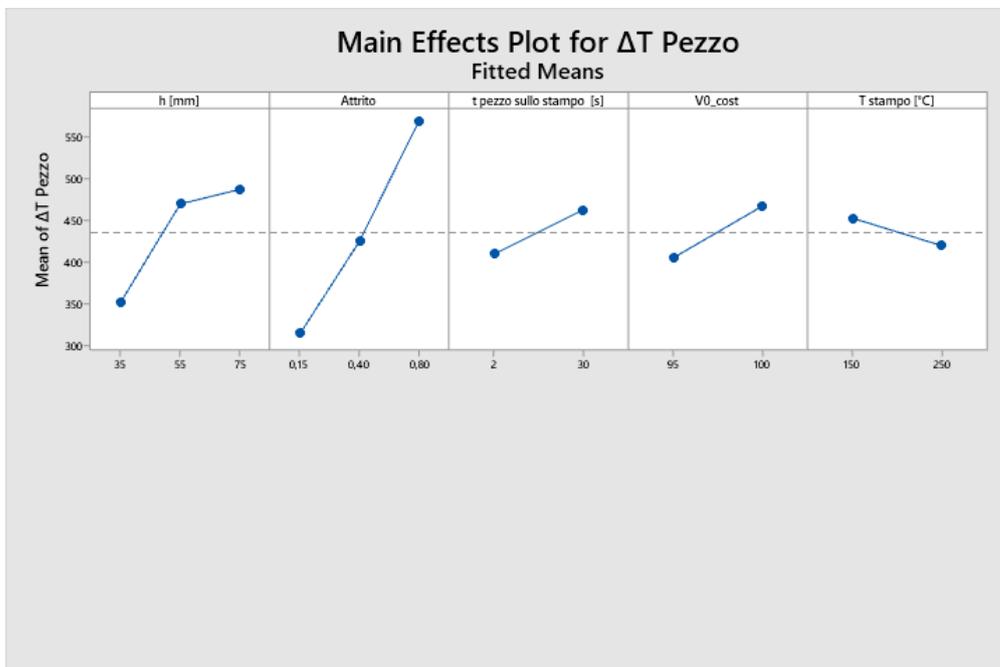


Figura 5.4: Main Effects Plot per ΔT pezzo

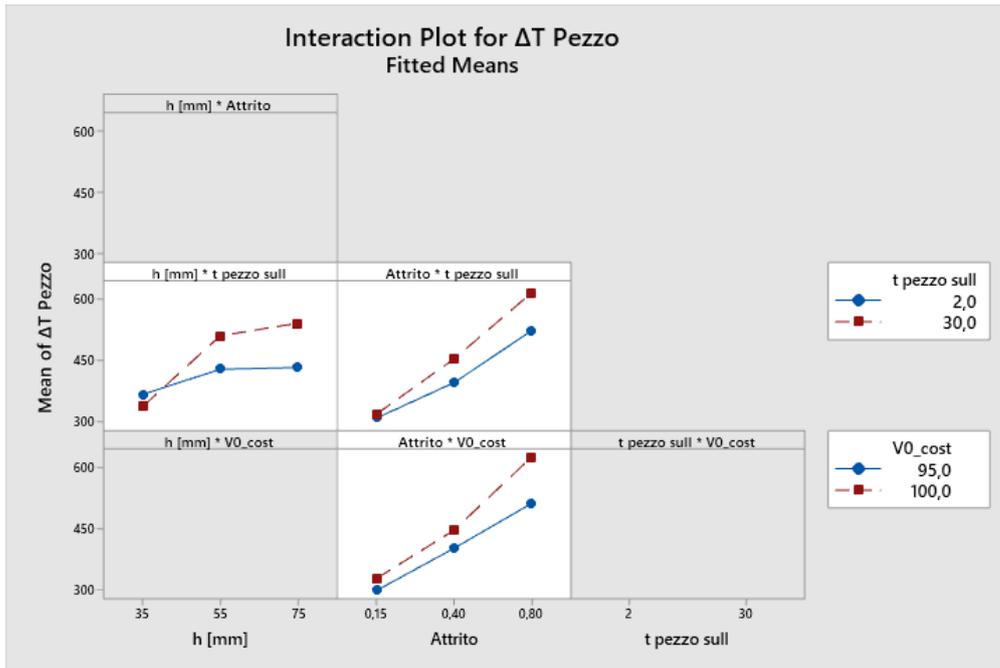


Figura 5.5: Interaction Plot per ΔT pezzo

WORKSHEET 1

Factorial Plots for σ_{max} stampo

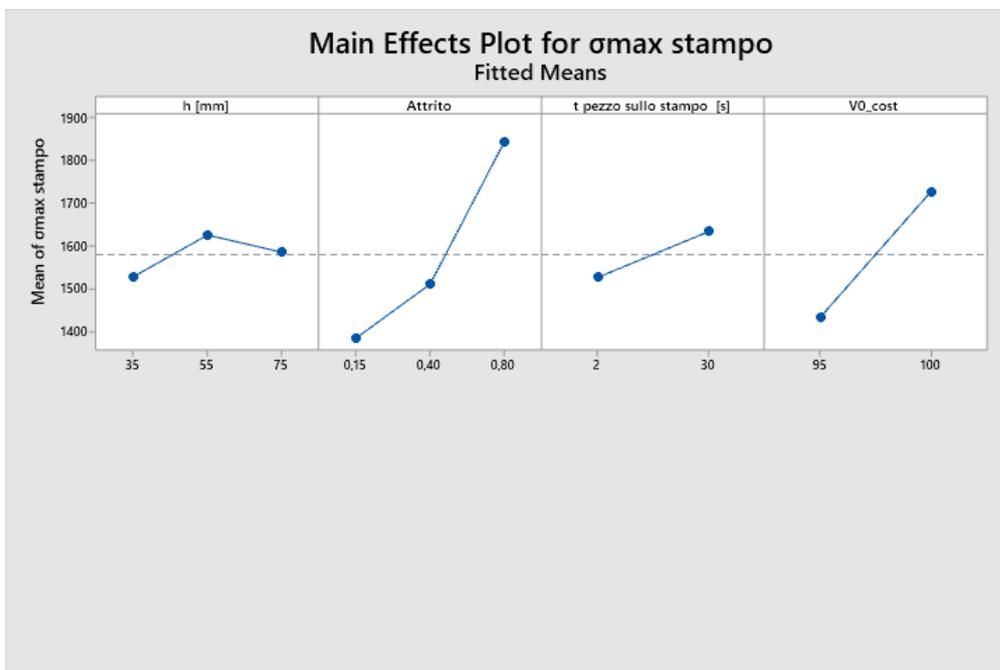


Figura 5.6: Main Effects Plot per σ_{max} stampo

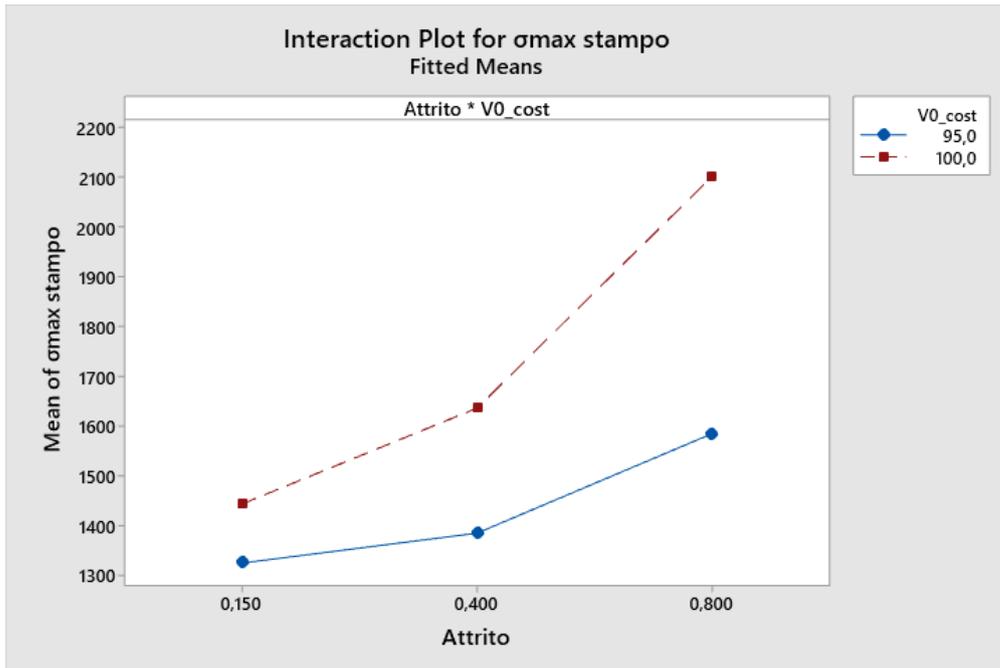


Figura 5.7: Interaction Plot per σ_{max} stampo

WORKSHEET 1

Factorial Plots for ΔT Stampo

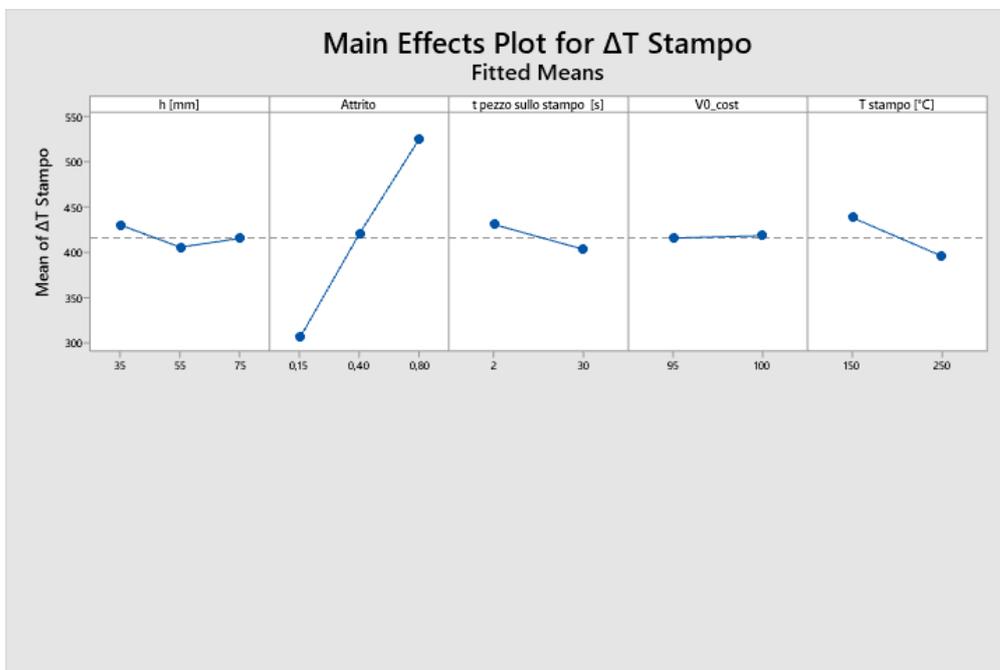


Figura 5.8: Main Effects Plot per ΔT sullo stampo

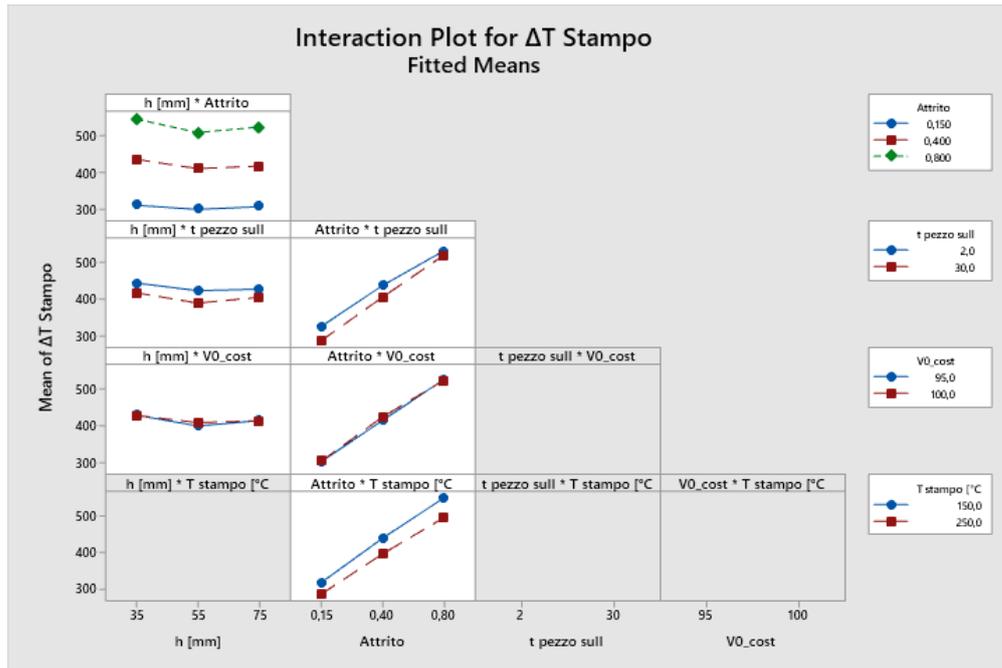


Figura 5.9: Interaction Plot per ΔT sullo stampo

Osservando i grafici degli effetti principali, si può affermare che il σ_{\max} stampo è quindi tanto maggiore quando il coefficiente di attrito è elevato e quando si ha una variazione del volume del componente sottoposto al processo di forgiatura a caldo. Infatti il massimo di σ_{\max} stampo si ha per un coefficiente di attrito pari a 0,8 (componente non lubrificato) e quando l'altezza del pezzo è pari a 100mm. L'altezza della billetta dopo la ricalcatura e il tempo di permanenza del pezzo sullo stampo in questo caso sono poco influenti.

Per quanto riguarda il ΔT stampo risulta anche in questo caso che l'attrito gioca un ruolo fondamentale per analizzare gli sbalzi di temperatura sul pezzo durante il processo di forgiatura.

Come nel caso precedente ad un valore di attrito elevato, corrisponde un valore elevato di ΔT stampo. Gli altri fattori risultano invece tutti poco influenti.

Analizzando i valori di tensione massima sul pezzo, si può notare come tutti i fattori di disturbo influenzino la risposta secondo un andamento lineare. In particolare si può notare che il tempo di permanenza del pezzo sullo stampo è il fattore che presenta una pendenza più elevata rispetto agli altri.

Per quanto riguarda la massima variazione di temperatura presente sul pezzo, questa è influenzata specialmente dall'attrito che è un parametro di progetto.

6 Ottimizzazione dei modelli

Una volta ottenuti i modelli ed analizzati i grafici, è stato poi utilizzato lo strumento “Response optimizer” di Minitab 19 per cercare i valori ottimali dei parametri di output.

In particolare, sono stati cercati:

- il minimo valore locale di ΔT stampo
- il minimo valore locale di ΔT pezzo
- il minimo valore locale di σ_{\max} stampo
- il minimo valore locale di σ_{\max} pezzo
- il minimo valore locale della combinazione di ΔT stampo, σ_{\max} stampo

Si può osservare di seguito, come in ogni caso riportato precedentemente i fattori di input che minimizzano l’output riportati nella tabella “Solutions”, sono fattori già noti e riportati nella tabella che definisce i livelli per il DOE. Non è stato pertanto necessario eseguire nuove analisi per ottimizzare i modelli.

WORKSHEET 1

Response Optimization: ΔT Stampo

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
ΔT Stampo	Minimum		254,908	603,374	1	1

Solution

Solution	h [mm]	Attrito	t pezzo sullo stampo [s]	V0 cost	T stampo [°C]	ΔT Stampo Fit	Composite Desirability
1	55	0,15	30	100	250	254,312	1

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
h [mm]	55
Attrito	0,15
t pezzo sullo stampo [s]	30
V0 cost	100
T stampo [°C]	250

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
ΔT Stampo	254,31	1,93	(250,39; 258,24)	(247,63; 260,99)

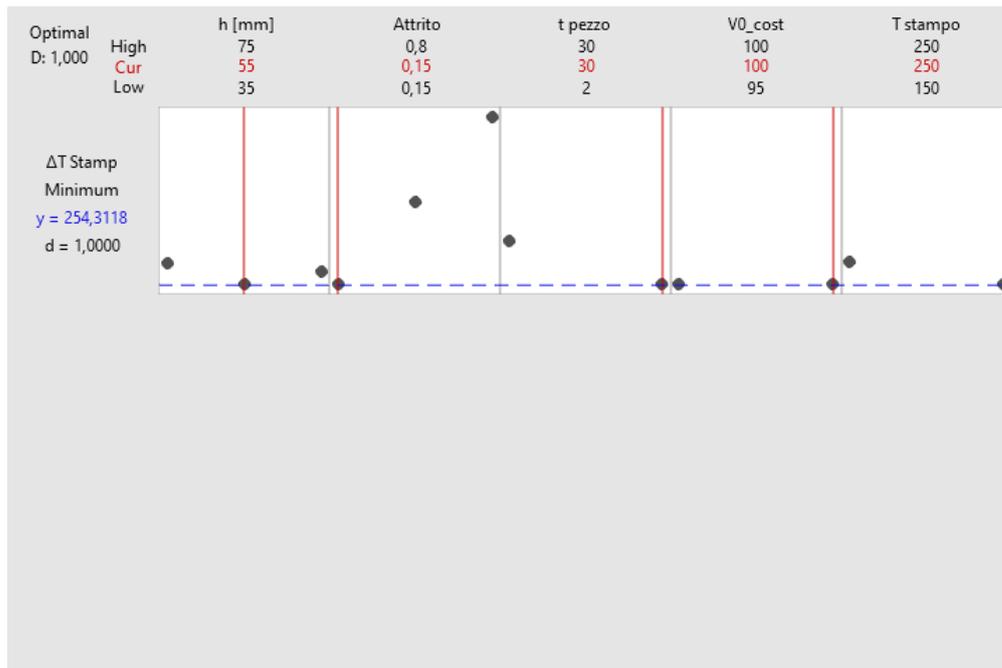


Figura 6.1: Ottimizzazione dei modelli per il minimo valore locale di ΔT stampo

Response Optimization: ΔT Pezzo

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
ΔT Pezzo	Minimum		186,526	773,717	1	1

Solution

Solution	h [mm]	Attrito	t pezzo sullo stampo [s]	V0_cost	T stampo [°C]	ΔT Pezzo Fit	Composite Desirability
1	35	0,15	30	95	250	170,093	1

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
h [mm]	35
Attrito	0,15
t pezzo sullo stampo [s]	30
V0_cost	95
T stampo [°C]	250

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
ΔT Pezzo	170,09	9,58	(150,89; 189,29)	(125,07; 215,12)

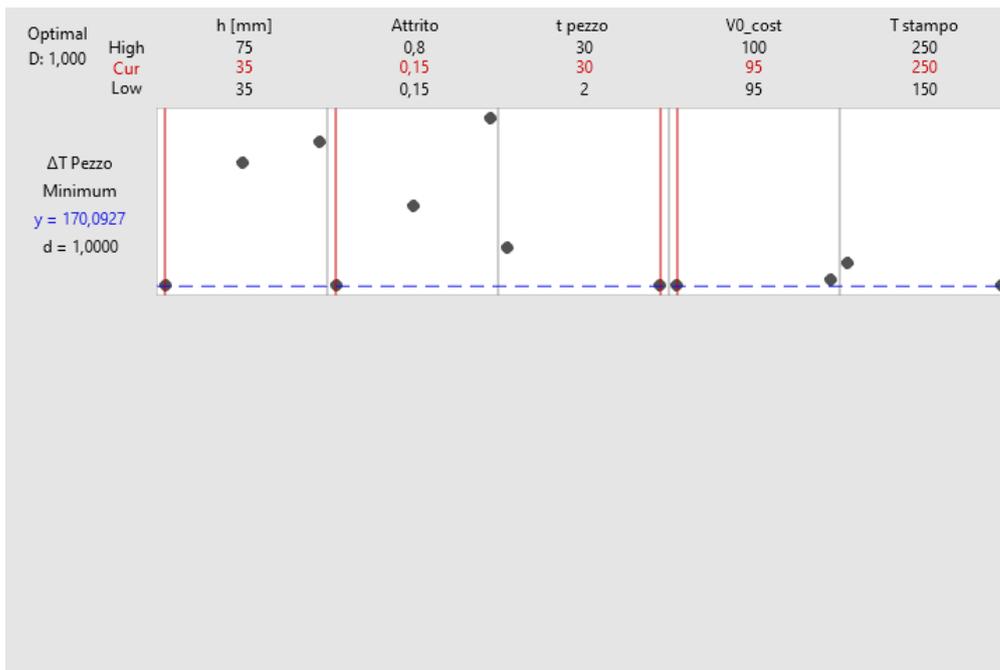


Figura 6.2: Ottimizzazione dei modelli per il minimo valore locale di ΔT pezzo

Response Optimization: σ_{\max} stampo

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
σ_{\max} stampo	Minimum		1302,79	2272,64	1	1

Solution

Solution	h [mm]	Attrito	t pezzo sullo stampo [s]	V0_cost	T stampo [°C]	σ_{\max} stampo Fit	Composite Desirability
1	35	0,15	2	95	250	1219,35	1

Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
h [mm]	35			
Attrito	0,15			
t pezzo sullo stampo [s]	2			
V0_cost	95			
T stampo [°C]	250			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
σ_{\max} stampo	1219,4	36,3	(1146,8; 1291,9)	(1020,0; 1418,7)

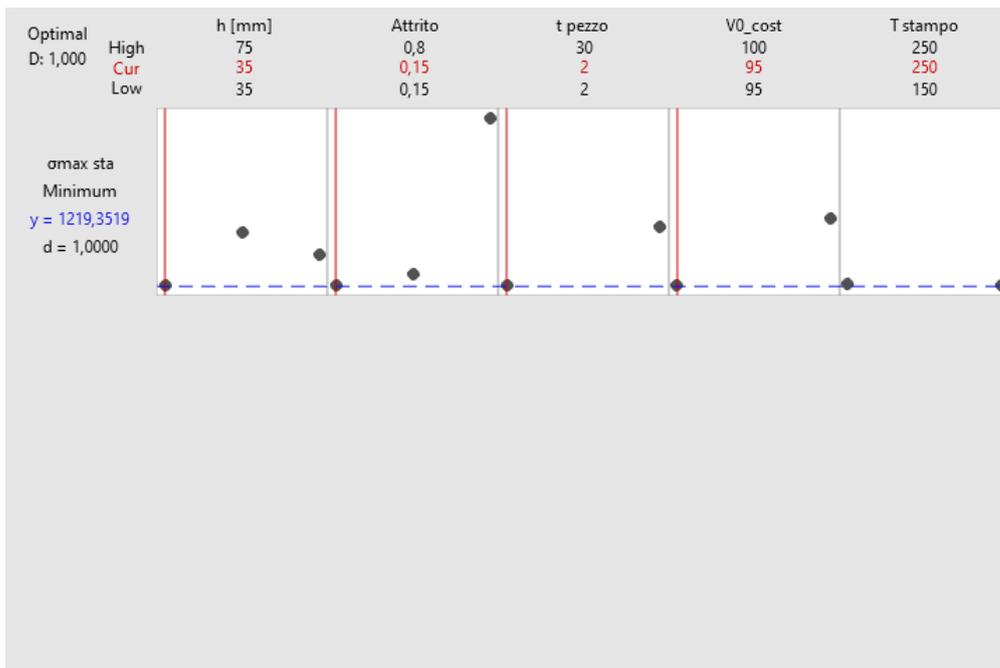


Figura 6.3: Ottimizzazione dei modelli per il minimo valore locale di σ_{\max} stampo

Response Optimization: σ_{\max} pezzo

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
σ_{\max} pezzo	Minimum		135,701	260,424	1	1

Solution

Solution	h [mm]	Attrito	t pezzo sullo stampo [s]	V0_cost	T stampo [°C]	σ_{\max} pezzo Fit	Composite Desirability
1	55	0,15	2	95	250	132,243	1

Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
h [mm]	55			
Attrito	0,15			
t pezzo sullo stampo [s]	2			
V0_cost	95			
T stampo [°C]	250			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
σ_{\max} pezzo	132,24	5,71	(120,79; 143,70)	(106,62; 157,86)

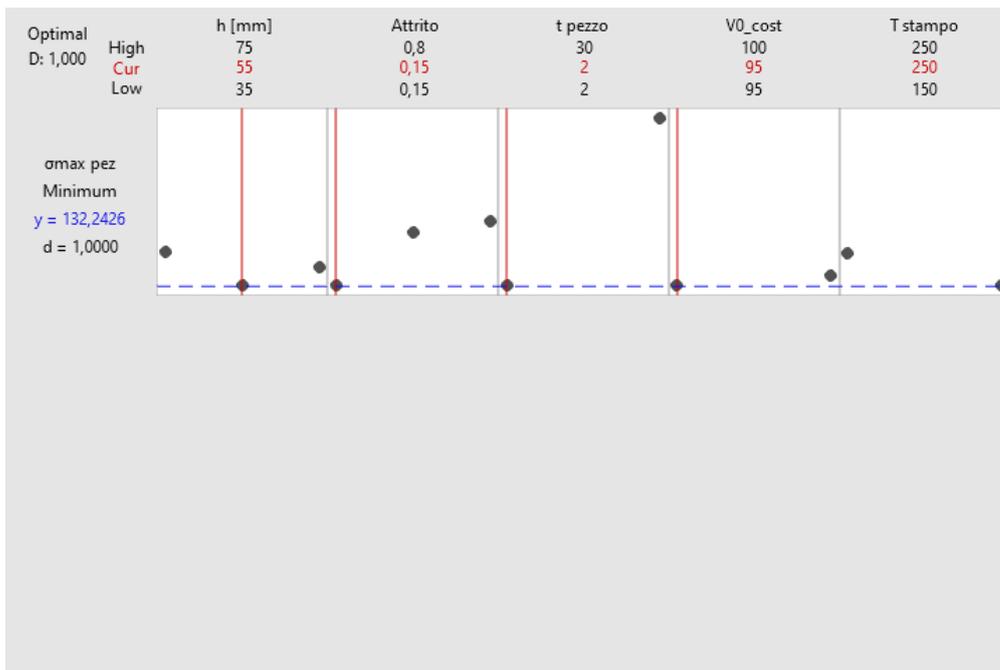


Figura 6.4: Ottimizzazione dei modelli per il minimo valore locale di σ_{\max} pezzo

Response Optimization: σ_{\max} stampo; ΔT Stampo

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
σ_{\max} stampo	Minimum		1302,79	2272,64	1	1
ΔT Stampo	Minimum		254,91	603,37	1	1

Solution

Solution	h [mm]	Attrito	t pezzo sullo stampo [s]	V0_cost	T stampo [°C]	σ_{max} stampo Fit	ΔT Stampo Fit	Composite Desirability
1	35	0,15	30	95	250	1326,73	281,745	0,948790

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
h [mm]	35
Attrito	0,15
t pezzo sullo stampo [s]	30
V0_cost	95
T stampo [°C]	250

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
σ_{max} stampo	1326,7	36,3	(1254,2; 1399,3)	(1127,4; 1526,1)
ΔT Stampo	281,75	1,93	(277,82; 285,67)	(275,07; 288,42)

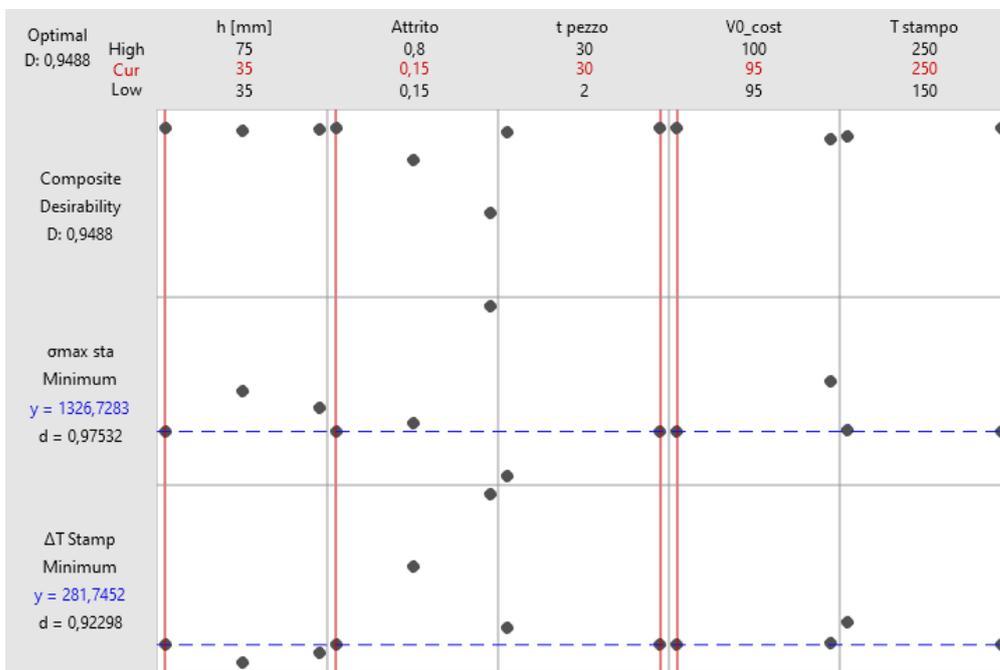


Figura 6.5: Ottimizzazione dei modelli per il minimo valore locale della combinazione di ΔT stampo e σ_{max} stampo

7 Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi è stato quello di verificare l'interazione tra i diversi fattori di disturbo e di progetto mediante l'analisi degli elementi finiti. Per far ciò, ci si è serviti dell'applicazione della metodologia del Design of Experiment applicata ad un processo di stampaggio a caldo che è stato simulato tramite software, dopo aver definito una serie di prove nelle quali le variabili in ingresso (fattori) sono stati fatti variare secondo una modalità programmata. In particolare, per svolgere questo processo:

- è stato scelto un componente in 2D per analizzare lo stampo superiore ed inferiore
- sono stati scelti dei fattori che si sono ritenuti significativi e sui quali si è voluto indagare
- sono stati scelti dei parametri di out-put su cui valutare gli effetti

Con l'analisi dei dati ottenuti mediante le 72 simulazioni, si è arrivati poi a una vera e propria ottimizzazione del processo e con l'analisi dei risultati ottenuti è possibile ricavare conclusioni che possono essere utilizzate per migliorare l'intero processo di forgiatura a caldo di un componente in metallo, andando a diminuire le tensioni e gli sbalzi di temperatura massimi raggiunti nello stampo.

Analizzando i dati relativi al ΔT stampo si può constatare come l'attrito, influisca notevolmente sul processo di stampaggio, mentre i fattori di disturbo ossia variazione del volume iniziale, tempo di permanenza del pezzo sullo stampo e temperatura iniziale dello stampo, non hanno ripercussioni consistenti sulla risposta finale.

Ci sono diversi processi che portano al deterioramento degli stampi e questi possono anche manifestarsi contemporaneamente. In generale si possono distinguere la deformazione plastica, la fatica meccanica e rottura totale, l'usura e le cricche da fatica termica.

Mantenere un ΔT stampo non elevato è fondamentale per evitare rotture da fatica termica.

Le cricche da fatica termica vengono amplificate dai seguenti fattori:

- temperatura della billetta troppo alta
- tempi di contatto elevati con la billetta ad alta temperatura
- preriscaldamento dello stampo inadeguato
- selezione errata dei materiali dello stampo e della billetta
- trattamento termico non adeguato

Tutti i fattori elencati, aumentano la differenza tra la temperatura massima e minima della superficie della matrice dello stampo.

Analizzando invece i risultati ottenuti per σ_{max} stampo si può osservare che giocano un ruolo fondamentale il volume iniziale del pezzo ed il coefficiente di attrito.

Le sollecitazioni massime presenti sugli stampi possono essere responsabili del fenomeno dell'abrasione. Il processo di usura è più pronunciato nei cordoni di bava e nei raggi convessi ed aumenta notevolmente se la temperatura di forgiatura è ridotta in quanto si verifica quando il materiale da stampare scorre ad alta velocità sulla superficie della cavità sotto l'azione dell'alta pressione.

Si può anche incorrere nel fenomeno della deformazione plastica, in corrispondenza di elevate sollecitazioni locali presenti sulla matrice dello stampo, che superano il limite di snervamento dell'acciaio. Le cause principali di deformazione plastica negli stampi sono:

- stress da scorrimento elevati a causa di temperature della billetta bassa
- acciaio non resistente al caldo
- temperatura eccessivamente elevata della matrice dello stampo
- acciaio non abbastanza duro

La deformazione plastica è abbastanza comune quando componenti dell'utensile lunghi sottili (come i punzoni) sono sottoposti a elevate sollecitazioni di flessione oppure sono comuni nei raggi convessi.

7.1 Limiti dell'analisi

Parlando di limiti del modello nel caso in esame, si può affermare che:

- un primo limite è dato dall'analisi 2D del componente: nonostante si abbia il vantaggio di eseguire le simulazioni più velocemente rispetto ad un'analisi 3D utilizzando il software QForm VX, si ha una visione meno completa dello stesso componente disegnato su CAD su tre dimensioni.
- il secondo limite è dato dal fatto che i componenti stampo più pezzo utilizzati nella simulazione, non sono componenti reali. Attraverso l'analisi è possibile ricavare il ruolo che ogni fattore di progetto e di disturbo gioca nel processo di forgiatura ma realizzando lo stesso processo con macchinari reali, si può anche incorrere in altri tipi di problemi come ad esempio: problemi causati da difetti presenti sul pezzo, problemi dovuti alle caratteristiche dell'ambiente di lavoro, a causa di errori dovuti a fenomeni casuali o non controllabili.

- il terzo limite è legato al tempo necessario per svolgere le simulazioni, le quali aumentano in base al numero di fattori. Tuttavia per capire quali fattori hanno influenza maggiore sulle risposte, non è necessario svolgere l'analisi più volte.

7.2 Considerazioni finali

I parametri di disturbo sono variabili che possono essere non note o non controllabili che agiscono sul sistema e modificano in maniera sostanziale i parametri di output di ΔT stampo, ΔT Pezzo e di σ_{\max} stampo e σ_{\max} pezzo. Riprendendo quanto detto precedentemente, lo sbalzo di temperatura sul pezzo dipende in maniera significativa anche dai fattori di disturbo, così come per σ_{\max} stampo è fondamentale anche l'effetto legato alla variazione del volume iniziale. Anche per quanto riguarda σ_{\max} pezzo è importante controllare tutti i parametri di disturbo ed in particolar modo il tempo di permanenza del pezzo sullo stampo che presenta un andamento lineare con una pendenza elevata, come mostrato nel grafico degli effetti principali.

Nello stampaggio a caldo dunque, per l'ottimizzazione matematica ingegneristica del processo, è necessario limitare l'effetto dannoso degli stessi parametri di disturbo che non possono essere totalmente eliminati ma il cui effetto può essere tuttavia limitato.

L'effetto dannoso legato al volume iniziale del pezzo ad esempio, può essere arginato mediante operazioni di tranciatura o segatura che saranno svantaggiose dal punto di vista dei costi e dei tempi di produzione ma che possono portare benefici in termini di affidabilità del processo e dal punto di vista di un utilizzo efficiente delle risorse.

Inoltre, è anche curioso osservare che i due meccanismi di usura sono sensibili in maniera diversa ai disturbi a seconda che si voglia controllare tensioni e temperatura sullo stampo oppure sul pezzo. Per arrivare all'ottimizzazione del processo di stampaggio a caldo di un componente in metallo quindi, bisogna accettare di limitare gli effetti legati a tutti i parametri scelti per trovare la combinazione ottimale dei valori di tensione e temperatura sia dello stampo che del pezzo.

8 Bibliografia

- [1] K. Venkatesan, C. Subramanian, E. Summerville, Three-body abrasion of surface engineered die steel at elevated temperatures (1997)
- [2] Modern, K. Lange, metal forming technology for industrial production, J. Mater. Process. Technol. (1997)
- [3] O. Brucelle, G. Bernhart, Methodology for service life increase of hot forging tools, J. Mater. Process. Technol. 87 (1999)
- [4] T. Altan, S.I. Oh, H.L. Gegel, Metal forming: Fundamentals and Applications, Am. Soc. Metals (1983).
- [5] H. Saiki, Tribology in warm and hot forming, JSTP Int. Sem. Precis. Forg. (1997).
- [6] Y. Marumo, Minami, T. Sono, H. Saiki, Effect of the surface structure on the resistance to plastic deformation of a hot forging tool
- [7] T.M. Silva, T.A. Dean, Die temperatures during production drop forging, J. Eng. Ind. 101 (1979) 385–390. [8] D.J. Jeong, D.J. Kim, J.H. Kim, T.A. Dean, B.M. Kim, Effects of surface treatments and lubricants for warm forging die life, J. Mater. Process. Technol. (2001)
- [8] Douglas C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments
- [9] John Lawson, Design and Analysis of Experiments with R