POLITECNICO DI TORINO DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E AEROSPAZIALE



Tesi di Laurea Magistrale

Previsione della vita utile degli stampi mediante analisi agli elementi finiti

Relatore Prof. Dario ANTONELLI

Correlatore Gianfranco GENTA

> Candidato Alessandro ALESSIO Matr.233482

Aprile 2021

A chi non molla mai.

Sommario

Il mercato manifatturiero è uno scenario complesso e diversificato che richiede da parte delle aziende l'adozione di metodi di produzione sempre migliori con lo scopo di incrementare efficienza, produttività e qualità con l'obiettivo, apparentemente antitetico, di abbassare i costi di produzione e massimizzare i profitti.

Nell'industria manifatturiera ogni giorno si pongono sfide di questo tipo e quella di maggiore interesse, che motiva questo studio, rientra nella progettazione di processo, in particolare per le operazioni di stampaggio a caldo.

Attualmente, il metodo di progettazione più diffuso nel settore degli stampi prevede l'adozione di pratiche iterative ed una significativa dose di esperienza. Così facendo, quando impiegato, il calcolatore è adoperato unicamente come strumento di verifica della formatura ma non fornisce alcuna indicazione sulla durata dello stampo e quindi sulla bontà del progetto. Tuttavia, un approccio più efficiente e maggiormente improntato alla riduzione dei costi per gli stampi vedrebbe l'impiego di analisi agli elementi finiti come caposaldo della progettazione.

Scopo di questa tesi è dare un contributo alla progettazione degli stampi andando a costruire un modello matematico adeguato in grado di generare l'ambito *digitaltwin* di uno stampo in esame e predirne con accuratezza il numero di "battute" per cui può essere usato prima di essere dismesso.

Lo studio è diviso in tre macro parti: nella prima vengono analizzate le condizioni dello stampo a *fine vita* mediante il supporto di prove di misura e micrografiche; nella seconda parte, con l'ausilio del software *QForm*®, viene svolta un'analisi DOE; infine, dopo aver ricavato i modelli matematici, vengono ottimizzati i parametri di processo.

Ringraziamenti

Esprimo profonda gratitudine nei confronti del Prof. Dario Antonelli per essere stato una presente guida e per la massima disponibilità concessami nello svolgimento di questa tesi.

Vorrei ringraziare anche il Prof. Gianfranco Genta, per i suoi determinanti consigli, ed il Prof. Roberto Doglione, per le sue preziose indicazioni, senza i quali questo lavoro non sarebbe stato possibile.

Un sincero ringraziamento va rivolto anche all'azienda Bersano Carlo S.p.A. e all'Ing. Massimiliano Varzino per aver fornito il materiale necessario a questo studio.

Un ringraziamento speciale lo rivolgo alla mia famiglia che è stata sempre presente nel corso di questi anni per sostenermi e darmi fiducia in ogni momento. Un caloroso grazie a tutti coloro che nel corso di questi anni sono entrati a far parte della mia vita, per il contributo che hanno apportato e per quello che ancora daranno in un percorso che è appena all'inizio.

Indice

El	enco	delle tabelle		VI			
El	enco	delle figure		VIII			
Si	mbol	ogia		XI			
1	Intr	oduzione		1			
	1.1	Introduzione al problema della forgiatura a caldo		1			
	1.2	Azienda Bersano Carlo: anomalia nella produzione		2			
	1.3	Stampi: durata e danneggiamento		3			
		1.3.1 Materiali e trattamenti per lo stampaggio		4			
		1.3.2 Fattori che influenzano la vita degli stampi		5			
		1.3.3 Modelli predittivi della durata degli stampi	•	6			
2	di laboratorio		9				
	2.1	Risultati del SEM e delle prove topologiche		9			
	2.2	Riconoscimento delle cause di rottura		13			
3	DOI	E		15			
	3.1	La programmazione degli esperimenti (DOE)		15			
		3.1.1 Piano fattoriale completo		16			
		3.1.2 Analisi della variabilità dei dati		17			
	3.2 Output della DOE						
		3.3.1 Fattore 1: altezza di ricalcatura della billetta		20			
		3.3.2 Fattore 2: temperatura di riscaldamento stampi		22			
		3.3.3 Fattore 3: coefficiente d'attrito del lubrificante		23			
	3.4	Definizione dei punti monitorati		24			
	3.5	Elaborazione dei modelli		25			
		3.5.1 Punto B		26			
		3.5.2 Punto C		28			

		3.5.3	Punto D	30				
		3.5.4	Punto d1	36				
		3.5.5	Punto d2	42				
		3.5.6	Punto d4	46				
		3.5.7	Punto d5	52				
		3.5.8	Punto d6	58				
	3.6	Ottimi	zzazione dei parametri	61				
		3.6.1	Ottimizzazione in B	62				
		3.6.2	Ottimizzazione in C	62				
		3.6.3	Ottimizzazione in D	63				
		3.6.4	Ottimizzazione in d1	66				
		3.6.5	Ottimizzazione in d 2	69				
		3.6.6	Ottimizzazione in d4	71				
		3.6.7	Ottimizzazione in d5	74				
		3.6.8	Ottimizzazione in d6	77				
	3.7	Analisi	i dei modelli	78				
1	Vori	ifica de	i modelli	00				
T	4 1	Misura	prioni e calcolo del coefficiente K	90				
4.1 MISURAZIONI E CALCOLO del COEMICIENTE Λ_{τ}								
	1.2	Conno		50				
5	Con	clusior	1 i 1	101				
	5.1	Vantag	ggi e svantaggi del modello .	102				
	5.2	Miglio	ramenti da apportare al modello 1	103				
A	Risı	ıltati d	lelle simulazioni 1	.05				
в	Car	atteris	tiche del materiale [8]	16				
Bi	3ibliografia 1							

Elenco delle tabelle

1.1	Composizione chimica H10
3.1	Livelli del fattore h
3.2	Livelli del fattore T
3.3	Livelli del fattore m
3.4	Coordinate dei punti acquisiti
3.5	Analisi della tensione equivalente in B
3.6	Analisi della tensione equivalente in C
3.7	Analisi della tensione media in D
3.8	Analisi della tensione equivalente in D
3.9	Analisi dell'usura in D
3.10	Analisi della tensione media in d1
3.11	Analisi della tensione equivalente in d1
3.12	Analisi dell'usura in d1
3.13	Analisi della tensione media in d2
3.14	Analisi della tensione equivalente in d2
3.15	Analisi della tensione media in d4
3.16	Analisi della tensione equivalente in d4
3.17	Analisi dell'usura in d4
3.18	Analisi della tensione media in d5
3.19	Analisi della tensione equivalente in d5
3.20	Analisi dell'usura in d5
3.21	Analisi della tensione equivalente in d6
3.22	Analisi dell'usura in d6
3.23	Tensione equivalente ottima in B
3.24	Tensione equivalente ottima in C
3.25	Tensione media ottima in D
3.26	Tensione equivalente ottima in D
3.27	Usura ottima in D 64
3.28	Ottimizzazione globale in D
3.29	Tensione media ottima in d 1

3.30	Tensione equivalente ottima in d1	66
3.31	Usura ottima in d1	67
3.32	Ottimizzazione globale in d1	68
3.33	Tensione media ottima in d2	69
3.34	Tensione equivalente ottima in d2	69
3.35	Ottimizzazione globale in d2	70
3.36	Tensione media ottima in d4	71
3.37	Tensione equivalente ottima in d4	71
3.38	Usura ottima in d4	72
3.39	Ottimizzazione globale in d4	73
3.40	Tensione media ottima in d 5	74
3.41	Tensione equivalente ottima in d $5 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	74
3.42	Usura ottima in d 5	75
3.43	Ottimizzazione globale in d 5	76
3.44	Tensione equivalente ottima in d 6	77
3.45	Usura ottima in d6	77
3.46	Ottimizzazione globale in d6	78
11		01
4.1	Calcolo del K_{τ}	91
4.2	Determinazione dell'usura ammissibile	93
4.3	Confronto tra valori calcolati e simulati	95

Elenco delle figure

1.1	Stampi integrali	3
1.2	Stampi compositi	3
1.3	Esempio di curve di tempra per acciaio H13 [3]	$\overline{7}$
1.4	Iterazione per il calcolo dell'usura [3]	8
2.1	Stampo per realizzazione dado di fissaggio	10
2.2	Vista panoramica della cricca	10
2.3	Segni dello <i>spalling</i> e dei segni di usura	10
2.4	Delaminazione estesa	11
2.5	Segni di innesco delle delaminazioni	11
2.6	Dettaglio delaminazione 150x	11
2.7	Dettaglio delaminazione 600x	11
2.8	Cricca intergranulare	12
2.9	Cricca secondaria	12
2.10	Dettaglio di una cricca secondaria	12
2.11	Effetti di carico gravoso sullo stampo	13
2.12	Esempio di cedimento elastico	14
3.1	Esempio di piani fattoriali	16
3.2	Esempi di altezza di ricalcatura inadeguata	21
3.3	Estremi dell'altezza di ricalcatura	22
3.4	Punti dello stampo monitorati	24
3.5	Residui tensione equivalente in B	27
3.6	Residui tensione equivalente in C	29
3.7	Residui tensione media in D	31
3.8	Residui tensione equivalente in D	33
3.9	Residui usura in D	35
3.10	Residui tensione media in d1	37
3.11	Residui tensione equivalente in d1	39
3.12	Residui usura in $d\overline{1}$	41
3.13	Residui tensione media in d2	43

Residui tensione equivalente in d2	45
Residui tensione media in d4	47
Residui tensione equivalente in d4	49
Residui usura in d4	51
Residui tensione media in d5	53
Residui tensione equivalente in d5	55
Residui usura in d5	57
Residui tensione equivalente in d6	59
Residui usura in d 6	61
Grafici degli effetti principali per la tensione media	79
Grafici degli effetti principali per la tensione equivalente	81
Grafici degli effetti principali per l'usura	82
Grafici delle interazioni per la tensione media	83
Grafici delle interazioni per la tensione equivalente	84
Grafici delle interazioni per l'usura	85
Grafici isolinee per la tensione media	86
Grafici isolinee per la tensione equivalente	88
Grafici isolinee per l'usura	89
Confronto stampo usurato con nominale	91
Zone critiche soggette ad usura	92
Messa in tavola forgiato	94
	Residui tensione equivalente in d2

Simbologia

\mathbf{T}

Temperatura di riscaldamento degli stampi

\mathbf{m}

Coefficiente d'attrito del lubrificante

\mathbf{h}

Altezza della billetta al termine della prima fase

W_t

Usura dovuta agli sforzi di taglio

lpha

Coefficiente di dilatazione termica

Φ_{ext}

Diametro esterno dello stampo

σ_m

Tensione media nello stampo

σ_{eq}

Tensione equivalente nello stampo calcolata secondo Von Mises

$K_{ au}$

Coefficiente empirico del modello d'usura

DOE

Design of experiments

ANOVA

Analysis of Variance

\mathbf{R} -sq

Coefficiente di correlazione

Capitolo 1 Introduzione

1.1 Introduzione al problema della forgiatura a caldo

La lavorazione dei metalli è un'operazione che risale a più di 5000 anni fa e si è sviluppata nelle tecniche e nei materiali fino ad oggi compiendo notevoli progressi. Tuttavia, anche se tanti processi sono stati studiati e spiegati nella loro interezza ce ne sono altri per i quali non si è giunti alla completa conoscenza ingegneristica. È questo il caso della forgiatura, in cui molto si può dire sul forgiato ma meno sugli stampi che vengono impiegati nella produzione, in particolare relativamente alla loro durata operativa.

Questo tema costituisce ad oggi un caso di studio in cui si tenta di correlare simulazioni numeriche a modelli matematici per esprimere un metodo generalizzato che unifichi tutti i fattori coinvolti nel processo. Il raggiungimento di un modello affidabile e semplice permetterebbe di facilitare la progettazione dei tecnici ed ottimizzare i processi industriali, in special modo per gli aspetti relativi ai fermi macchina ed i costi stessi degli utensili.

La continua ricerca della competitività da parte delle aziende manifatturiere all'interno di un mercato così vasto implica che si rispettino dei requisiti molto stringenti destinati ad essere un vero e proprio mezzo di *selezione naturale*. Tali requisiti possono essere velocemente riassunti:

- rispetto delle specifiche di progettazione e delle norme legate alla produzione e all'uso del bene prodotto,
- implementazione della qualità in ciascuna fase produttiva,
- adottare dei metodi di produzione flessibili atti a soddisfare le mutevoli esigenze del mercato e la puntualità delle consegne,

- essere al pari con lo stato dell'arte nelle tecnologie impiegate,
- adottare metodi e mezzi di produzione che consentano di minimizzare i costi.

Nei seguenti paragrafi si andrà ad analizzare la principale voce di costo nel processo di deformazione massiva di stampaggio a caldo e si porranno le basi motivazionali di questo lavoro di tesi.

1.2 Azienda Bersano Carlo: anomalia nella produzione

Bersano Carlo S.p.A., azienda dall'esperienza pluridecennale nel settore metalmeccanico dello stampaggio a caldo, riscontra un'anomalia nel processo di produzione di un particolare. Tale anomalia consiste in un problema di durata dello stampo per la realizzazione di un dado di fissaggio per assi di veicoli. In una prima fase la produzione si è servita di uno stampo costituito da due gusci integrali (Fig.1.1), tuttavia, la rottura avveniva dopo circa 1500 colpi quando le aspettative erano superiori di un ordine di grandezza; successivamente è stato scomposto ciascun semi-stampo in due parti (Fig.1.2): un anello esterno ed un perno centrale. Il motivo di questa scelta è quello di generare uno stato di pretensionamento dato dalla forzatura degli elementi che contribuisca a ridurre gli effetti delle sollecitazioni in formatura. Nonostante tale accorgimento l'estensione del numero di cicli di lavoro non è stata soddisfacente (solo 6000 cicli in più) e ha spinto l'azienda ad approfondire ulteriormente la questione. Lo scopo di questo lavoro è quello di identificare le cause di rottura ed estenderne la durata.

Questo lavoro di tesi si prefissa pertanto tre obiettivi:

- risalire alla causa primaria della sostituzione dello stampo,
- individuare un modello di calcolo per predire la durata dello stesso,
- ottimizzare i parametri di processo studiati per estendere la vita operativa dello stampo.

Come strumenti di supporto vengono impiegate simulazioni agli elementi finiti con software QForm® i cui risultati sono oggetto di analisi statistiche e di confronto con le prove micrografiche al microscopio elettronico SEM delle superfici abrase e deformate.





Figura 1.1: Stampi integrali

Figura 1.2: Stampi compositi

1.3 Stampi: durata e danneggiamento

Allo stampo per lavorazioni a caldo è principalmente richiesto di resistere ai forti sbalzi termici e mantenere la stabilità dimensionale anche sotto le forti pressioni causate dal processo di deformazione. Fattori come le alte temperature, le notevoli sollecitazioni, l'attrito, il rinvenimento del materiale etc., se non opportunamente controllati, possono portare ad una prematura usura degli stampi, la loro deformazione e conseguente dismissione.

Tipicamente, si rende necessaria la sostituzione dello stampo quando:

- si ha un eccesso di deformazione plastica e/o usura,
- la finitura superficiale del forgiato è inadeguata alle specifiche,
- si ha l'inizio della saldatura tra materiale da deformare e utensile,
- si innescano cricche o rottura.

Vista la complessità della moltitudine dei fattori in gioco e le severe specifiche richieste agli stampi, si può certamente affermare che un ruolo cruciale è svolto sia dalla loro composizione chimica, sia dalle condizioni in cui vengono adoperati.

1.3.1 Materiali e trattamenti per lo stampaggio

Gli acciai per le lavorazioni a caldo non sono solo tenuti a resistere a carichi di sollecitazione elevati e alte temperature, ma anche a notevoli fluttuazioni di quest'ultime. Tali condizioni, congiuntamente all'abrasione meccanica con i pezzi in lavorazione, fanno sì che i requisiti di resistenza richiesti siano notevoli. I requisiti indispensabili per uno stampo sono:

- resistenza alla deformazione plastica ad alta temperatura,
- resistenza all'usura,
- resistenza agli sbalzi termici,
- resistenza all'ossidazione,
- coefficiente di dilatazione termica minimo,
- buona lavorabilità,
- elevata stabilità al rinvenimento.

Tali caratteristiche si raggiungono mediante specifiche microstrutture e trattamenti termochimici. La durezza richiesta è affidata per lo più alla microstruttura: tipicamente si effettua un riscaldamento sopra la temperatura di austenitizzazione (non troppo elevata per evitare l'ingrossamento dei grani) e si effettua un rapido raffreddamento per ottenere martensite ed evitando che si formino dei carburi lungo bordi di grano dell'austenite. Tali carburi sarebbero pericolosi in quanto causerebbero l'infragilimento a bordo del grano. Con i successivi trattamenti termici di rinvenimento si rilassano le tensioni residue e si diffonde il carbonio in eccesso per trasformare l'austenite residua. Quest'ultima sarebbe deleteria per l'usura in quanto sensibilmente più tenera rispetto alla struttura martensitica. Effettuando il rinvenimento nell'intorno di 500°C si beneficia della precipitazione dei carburi che causa un aumento della durezza del materiale, effetto noto come *indurimento secondario*. Si noti che ogni trattamento termico deve essere sempre effettuato comunque ad una temperatura superiore a quella d'impiego dello stampo onde evitare successivi fenomeni di coalescenza dei carburi.

È per questo motivo che gli acciai più indicati per le lavorazioni a caldo si differenziano per il tenore di carbonio relativamente basso (tra 0.3-0.6%) e in relazione ai leganti (tipicamente Cr, Mo, W e V).

Lo stampo studiato è in acciaio ASTM H10 (WrN°/UNI 1.2365/32CrMoV12) e la sua composizione è mostrata in Tab.1.1.

In particolare il cromo aumenta la resistenza meccanica, la durezza, limite elastico, resistenza all'usura e temprabilità. In percentuali maggiori del 10.5%

$\mathbf{C}\%$	$\mathbf{Si}\%$	Mn%	Pmax $\%$	Smax $\%$	$\mathbf{Cr}\%$	$\mathbf{Mo}\%$	V%
0,28-0,35	0,10-0,40	$0,\!15\text{-}0,\!45$	0,03	0,02	2,70-3,20	2,5-3	$0,\!4\text{-}0,\!7$

 Tabella 1.1:
 Composizione chimica H10

rende gli acciai inossidabili. Il molibdeno migliora le proprietà meccaniche, la temprabilità, la fragilità da rinvenimento e migliora la resistenza alla corrosione. Il vanadio contribuisce a migliorare la resistenza all'usura.

Al fine di migliorare ulteriormente le caratteristiche di durezza superficiale vengono svolti trattamenti di nitrurazione che non lasciano tensioni residue di trazione. Tipicamente si cerca di ottenere una differenza strutturale degli strati in prossimità della superficie [1]:

- in superficie, per pochi μm , una struttura estremamente dura;
- subito sotto alla precedente, è richiesta anche una buona tenacità;
- fino a cuore il materiale deve avere proprietà che cambiano progressivamente fino ad uniformarsi.

Nel caso in analisi allo stampo è stato eseguito il seguente trattamento termico: austenitizzazione sottovuoto, raffreddamento in azoto in pressione, un primo rinvenimento sottovuoto ed un secondo in atmosfera controllata. Successivamente è stato sottoposto a nitrurazione, tuttavia non sono noti i valori di durezza superficiale finale.

1.3.2 Fattori che influenzano la vita degli stampi

La qualità di uno stampo è commisurata alla sua durata operativa e alla capacità di resistere ai fenomeni che lo degradano. Questi fenomeni possono essere riscontrati in maniera più o meno evidente quando si esamina uno stampo al termine del suo impiego e, tradizionalmente, i fenomeni che vengono imputati come causa della sostituzione sono: abrasione, deformazione plastica e, solo in maniera minore, propagazione di cricche e rotture.

Tali constatazioni, seppur corrette, omettono secondo Gronostajski et al. [2] una buona parte delle cause che hanno portato a quel danneggiamento: molti fenomeni non si manifestano singolarmente ma ciascuno è (o può essere) la causa scatenante di un altro che porta all'interazione di più elementi ed alla manifestazione di un unico effetto preponderante. I principali meccanismi di degradazione sono:

• usura per abrasione- in questo caso si ha il distacco di particelle di materiale che possono essere imputabili alla rugosità superficiale o alla distacco e trascinamento di carburi. Le particelle più dure asportate possono solcare la superficie dello stampo e facilitare l'innesco della fatica.

- usura per adesione- in particolari condizioni di pressione, velocità di scorrimento e temperatura si creano i presupposti affinché il materiale deformato si saldi con quello dello stampo. Al procedere dello scorrimento queste microsaldature si distruggono con il risultato di lasciare la superficie usurata e plasticizzata.
- ossidazione- la superficie libera dello stampo può reagire con l'ossigeno presente nell'aria. Tale fenomeno è facilitato con le alte temperature e queste determinano anche la tipologia di ossidi e la loro durezza. Così come per il distacco dei carburi, quello degli ossidi è pericoloso perché porta ad una abrasione precoce dello stampo e alla solcatura della superficie con pericoli di innesco cricche.
- fatica termomeccanica- l'applicazione di carichi ciclici notevoli e il continuo riscaldamento e raffreddamento dello stampo inducono uno stato di sollecitazione alternativamente di trazione e compressione. Questo fatto, sommato alle microfessure sulla superficie, può indurre una propagazione delle cricche.
- deformazione plastica- il carico di snervamento proprio del materiale è una funzione della temperatura. Tanto maggiore è la temperatura tanto più bassa è la sollecitazione necessaria per deformarlo.

Si evince come il processo di stampaggio a caldo possa essere interessato contemporaneamente da tutti i meccanismi descritti, per questo motivo è necessario identificare il giusto equilibrio dei parametri di processo che limitino il degenerare di tutti i fenomeni e non solo uno in particolare.

Nondimeno la possibilità che si manifestino tali meccanismi non è indipendente dalla geometria: nelle zone pianeggianti tendono a scaricarsi maggiormente le pressioni di contatto e, se questo perdura nel tempo, è facile che si vada incontro alla fatica termomeccanica; sui raggi interni è più facile riscontrare cricche per fatica a causa degli sforzi di trazione generati durante il riempimento; infine, sui raggi esterni, è dove è più significativa l'usura per abrasione, per via dello scorrimento del materiale, e la deformazione plastica, per le intense sollecitazioni accompagnate dall'alta temperatura.

1.3.3 Modelli predittivi della durata degli stampi

Dal momento che, al netto di tutti i meccanismi di danneggiamento, quelli dagli effetti più marcati sono l'usura per abrasione e la deformazione plastica, Kim et al.[3] hanno suggerito due metodi per stimare la durata operativa degli stampi. In ogni caso la temperatura è il fattore determinante: ha a che fare sia con il *thermal* softening quindi con la conseguente diminuzione della durezza superficiale, sia con la variazione del carico di snervamento.

Con il primo metodo è possibile predire la deformazione plastica locale. Per considerare l'addolcimento del materiale si fa riferimento alla formulazione di Hollomon-Jaffe ed al parametro di tempra M:

$$M = T \cdot (C + \log_{10} t) \cdot 10^{-3} \tag{1.1}$$

dove T è la temperatura in gradi Kelvin, C è una costante del materiale (che per gli acciai per utensili è ≈ 20) e t è il tempo in secondi.

Dal momento che durante l'operazione di formatura la temperatura superficiale degli stampi varia, perché dipende dalle condizioni di riscaldamento, dagli scambi termici, dal tempo di contatto con la billetta e dal regime termico, si introduce un valore equivalente della temperatura:

$$T_m = \frac{2T_{max} + T_{min}}{3} \tag{1.2}$$

Dalle curve di tempra caratteristiche del materiale, del tipo mostrate in Fig.1.3, in funzione del valore limite di deformazione plastica, si ricava il corrispondente valore del parametro di tempra, M_{yield} .

Si calcola quindi il massimo tempo di esposizione, t_h , per raggiungere il valore critico di durezza:

$$t_h = \exp\left(\frac{M_{yield} * 1000}{T_{eq}} - C\right) \tag{1.3}$$

Una volta noto t_h è sufficiente rapportarlo al tempo della singola battuta per determinare il massimo numero di cicli.



Figura 1.3: Esempio di curve di tempra per acciaio H13 [3]

Con il secondo metodo si prevede la vita dell'utensile sulla base dell'usura calcolata. Il processo è iterativo e sfrutta il modello di Archard [4]:

$$V = \frac{k \cdot P \cdot l}{3h} \tag{1.4}$$

dove V è la profondità materiale asportato, k è un coefficiente adimensionale, Pè la pressione normale alla superficie, l è la distanza di scorrimento tra il forgiato e la superficie dello stampo, h è la durezza superficiale di quest'ultimo. In merito alla variazione della durezza è necessario che il calcolo venga ripetuto secondo lo schema proposto in Fig.1.4 ad ogni ciclo di lavoro. Per questo motivo si sfruttano le analisi agli elementi finiti che consentono di effettuare il calcolo in ogni punto dello stampo e simulano con i dati di temperatura e tempo di esposizione la nuova durezza superficiale. I valori di usura vengono sommati ad ogni ciclo e raffrontati a quelli limite previsti, quindi l'analisi termina quando questi ultimi vengono eguagliati o superati.



Figura 1.4: Iterazione per il calcolo dell'usura [3]

Capitolo 2 Test di laboratorio

La possibilità di generare il gemello digitale dello stampo è vincolata al riconoscimento dei fenomeni che si sono verificati durante l'esercizio e al successivo riscontro nei risultati delle simulazioni.

Tuttavia lo stampo preso in esame è un caso molto particolare e, per certi versi, non il migliore per ricostruire il modello di usura, in quanto la causa della sua sostituzione è la manifestazione di una cricca (Fig.2.1).

Individuare la causa scatenante della frattura è fondamentale per porre un rimedio efficace pertanto, dal momento che individuare morfologia e distribuzione delle cricche può dare delle chiare indicazioni sulla storia del pezzo, sono state predisposte delle analisi al microscopio elettronico. Di seguito sono esposti i risultati.

2.1 Risultati del SEM e delle prove topologiche

Il microscopio utilizzato è della tipologia *SEM* (Microscopio Elettronico a Scansione) che sfrutta un fascio di elettroni per scansionare il campione esaminato.

Il fascio di elettroni è generato da un filamento in tungsteno e viene deviato e concentrato da una serie di lenti prima di interagire con il campione. Il segnale elettrico risultante viene quindi acquisito da un rilevatore, modulato e digitalizzato permettendo la visione su schermo dell'ingrandimento. L'immagine è monocromatica e l'intensità del singolo segnale modula la luminosità del pixel corrispondente. Per consentire il funzionamento è inoltre necessario operare in condizioni di vuoto spinto.

Le illustrazioni che seguono fanno riferimento alla superficie fratturata in corrispondenza del bordo circolare interno dell'anello.

La Fig.2.2 mostra un ingrandimento generale della zona danneggiata: sono immediatamente riconoscibili le zone interessate dall'asportazione di materiale e



Figura 2.1: Stampo per realizzazione dado di fissaggio

sono visibili cricche e fessurazioni di diversa natura.

In Fig.2.3 è messo in evidenza il fenomeno dello *spalling* ovvero la scheggiatura (tipica dei fenomeni d'urto) a cui ha fatto seguito uno strisciamento che ha quindi consumato spigoli e creste; è ben visibile anche la direzione di scorrimento delineata dalle piccole fessure.



Figura 2.2: Vista panoramica della cricca



Figura 2.3: Segni dello *spalling* e dei segni di usura

Sul lato destro della stessa foto sono riconoscibili delle piccole zone delimitate da bordi frastagliati ma poco profondi che indicano che c'è stata usura adesiva in quel punto.





Figura 2.4: Delaminazione estesa

Figura 2.5: Segni di innesco delle delaminazioni





Figura 2.6: Dettaglio delaminazione **Figura 2.7:** Dettaglio delaminazione 150x 600x

Nelle figura 2.4 e nei suoi ingrandimenti viene mostrata la morfologia della frattura. Si notano delle cricche molto profonde che sono tipiche di quei casi in cui si ha la propagazione lungo i bordi di grano austenitici. Tuttavia, data l'estensione del fenomeno, affinché l'austenite cresca in tal modo sarebbero necessarie temperature e tempi di esposizione ben più elevati di quelli che si riscontrano nelle simulazioni, pertanto sorge il dubbio riguardo alla qualità del trattamento termico effettuato. Il fenomeno della delaminazione consiste in cricche che si innescano in un determinato punto, propagano parallelamente alla superficie per poi riaffiorare causando il distacco di una lamina di materiale.



Figura 2.8: Cricca intergranulare

Figura 2.9: Cricca secondaria



Figura 2.10: Dettaglio di una cricca secondaria

Congiuntamente alle cricche principali si riscontrano delle cricche secondarie. Queste propagano perpendicolarmente alla superficie sotto l'applicazione dei carichi di stampaggio. Sono particolarmente evidenti nelle Fig.2.9 e 2.10 in cui sono visibili anche altri segni della gravosità delle condizioni di lavoro come i solchi lasciati dallo sfregamento.

Infine, il dettaglio riportato in Fig.2.11 mostra i segni evidenti dell'usura e delle alte sollecitazioni sviluppate. La profondità delle fenditure, la presenza di cricche e delaminazioni denota come in questo particolare punto dello stampo le condizioni di carico siano eccessive e che è fortemente consigliata l'adozione di contromisure opportune.



Figura 2.11: Effetti di carico gravoso sullo stampo

2.2 Riconoscimento delle cause di rottura

Secondo una prima analisi, il motivo per cui si manifesta la frattura sul bordo dello stampo è per propagazione di frattura intergranulare. I grani austenitici sono i maggiori indiziati e con essi il trattamento termico a cui è stato sottoposto lo stampo.

Vi è inoltre la possibilità che a contribuire alla frattura del bordo sia il fenomeno del *fretting* che si manifesta quando sono presenti minimi scorrimenti alternati, di ampiezze fino a 0.2-0.3mm, accompagnati da forti pressioni di contatto (come negli accoppiamenti per interferenza). Sia le simulazioni al calcolatore che la testimonianza diretta dell'azienda garantiscono la presenza di un cedimento elastico tra anello e perno che causa uno "scalino" sul forgiato (Fig.2.12); tale cedimento può essere la causa dello scorrimento alternato tra anello e perno che, sommato alle condizioni di carico ciclico, gli sbalzi di temperatura ecc., potrebbe generare delle cricche che propagando riaffiorano sulla superficie piana causando la frattura. A sostegno di questa teoria ci sarebbe anche il fenomeno dello spalling che è compatibile con le forti pressioni di contatto.



Figura 2.12: Esempio di cedimento elastico

La presenza di zone fortemente danneggiate dai carichi suggerisce inoltre di rivedere i parametri di processo e, se necessario, la forma dello stampo. Questa operazione è tanto consigliata quanto necessaria in caso di effettiva risoluzione del problema della frattura, in quanto si rischierebbe di non beneficiare appieno delle potenzialità dello stampo per il sopraggiungere di altre problematiche.

A tale scopo, con i risultati dei modelli analitici ricavati grazie alla DOE, sarà possibile effettuare un'ottimizzazione dei parametri.

Capitolo 3 DOE

3.1 La programmazione degli esperimenti (DOE)

La programmazione degli esperimenti, in inglese DOE, è una tecnica molto utilizzata per ottimizzare i processi. Quando un fenomeno è condizionato da una serie di fattori, alle volte numerosi, può non essere scontato sapere come controllarli, specialmente durante l'esecuzione di un processo industriale; in alcuni casi il controllo è limitato solo ad un ristretto numero di variabili, per questo è opportuno conoscere quelle che, prese singolarmente o contemporaneamente ad altre, portano ad ottenere l'esecuzione ottimale del processo. Disporre di una campagna di esperimenti ben organizzata per un processo permette di conoscerlo a fondo, ridurne i relativi costi e predire gli effetti delle variazioni dei fattori.

Per poter eseguire una DOE è necessario definire il processo nella sua struttura:

- **Fattori**: sono gli input del processo e sono divisibili in *controllabili* e *incontrollabili*;
- Livelli: a ciascun fattore vengono assegnati due o più livelli e rappresentano il valore che assumono nel caso specifico;
- **Risposte**: costituiscono l'output dell'esperimento, devono essere quantificabili per essere correlate alla variabilità dei fattori in ingresso.

La numerosità di fattori e livelli viene scelta in base al grado di dettaglio con cui si vuole conoscere il processo e alle risorse a disposizione. Seppure un fenomeno possa essere condizionato da un numero elevato di fattori, nella maggior parte dei casi non si dispone della potenza di calcolo necessaria per considerarli tutti, pertanto l'utente che svolge l'analisi dovrà fare una prima scrematura e scegliere quelli che ritiene influiscano maggiormente sulla risposta. Il secondo passo prevede la definizione dei livelli. Questo numero deve essere ponderato con attenzione perché contribuisce ad aumentare in modo significativo il numero di esperimenti: con due livelli si può valutare il tipo di relazione tra input e output, se crescente o decrescente, ma non vi è la possibilità di identificare non linearità nell'andamento all'interno dell'intervallo considerato.

In taluni casi è possibile aggirare il problema del numero di prove mediante tecniche che non verranno trattate all'interno di questo elaborato; in questa sede verrà descritto brevemente il piano fattoriale completo, coerentemente con l'esecuzione della DOE svolta in questo studio.

Successivamente alla caratterizzazione del problema vengono svolte le prove a cui fa seguito l'analisi dei dati ricavati. Si tenga presente che l'attendibilità statistica dei risultati è legata alla loro replicazione, pertanto l'esperimento deve essere ripetuto mantenendo invariati i dati in ingresso. Ciascun risultato ottenuto da ogni singola prova sarà il frutto di una media campionaria. Nel caso di studio, tuttavia, gli esperimenti sono simulati al PC, pertanto i criteri di *replicazione* e di *casualizzazione* (cioè la realizzazione degli esperimenti in modo tale da evitare l'introduzione di errori sistematici) perdono di significato in quanto ogni esperimento svolto nelle medesime condizioni dei fattori porterebbe comunque allo stesso esito.

3.1.1 Piano fattoriale completo

I piani fattoriali permettono di studiare simultaneamente gli effetti dei fattori su un processo. Il vantaggio di uno studio simultaneo non è solo quello, come anticipato poc'anzi, di determinare quali tra i fattori considerati hanno maggiore influenza ma, soprattutto, se vi è interazione tra gli stessi. Sulla base di queste relazioni è possibile dedurre quale combinazione dei fattori ottimizza meglio la risposta.

In un esperimento con piano fattoriale completo le risposte sono misurate per tutte le combinazioni dei livelli dei fattori; ciascuna combinazione rappresenta una prova. L'intera serie di prove costituisce il piano.



Figura 3.1: Esempio di piani fattoriali

Il numero di prove da svolgere cambia quindi in relazione ai fattori ed ai loro livelli. Ma in che modo?

- con un solo fattore e con **n** livelli si devono pianificare **n** prove;
- con 2 fattori, ciascuno con 2 livelli, le prove sono 2x2;
- con **k** fattori, ciascuno con 2 livelli, le combinazioni sono 2^k ;
- con 3 livelli per i \mathbf{k} fattori le possibili combinazioni diventano 3^k , ecc.

Nel caso di studio specifico sono stati scelti 3 fattori e per ciascuno sono stati definiti 3 livelli. Nei paragrafi successivi sono riportate maggiori dettagli a riguardo.

3.1.2 Analisi della variabilità dei dati

Nell'esecuzione di una DOE è indispensabile determinare la bontà dei risultati estrapolati. Oltre agli errori di misura anche altre cause possono alterare i risultati ed essere quindi fonti di errore. Con il termine *errore*, ora ed in seguito, verrà fatto riferimento alle variazioni non attese e quindi non spiegate dall'esecuzione degli esperimenti. Bisogna tener presente che durante la progettazione del piano di esperimenti è possibile adottare delle contromisure che possono limitare l'effetto di questi errori: i fattori incontrollabili che inducono ad errore in condizioni operative normali sono chiamati "fattori di rumore", includendoli opportunamente nell'esperimento è possibile fare in modo che il loro contributo non venga confuso con l'errore dell'esperimento.

Fortunatamente, mediante un'analisi statistica dei dati è possibile risalire all'entità di tale errore e quindi determinare l'attendibilità dei modelli ricavati. L'analisi della varianza, ANOVA in inglese, permette di confrontare due o più gruppi di dati confrontando la variabilità interna a questi gruppi con la variabilità tra i gruppi. L'ANOVA valuta le fonti di variazioni **sistematiche**, sotto controllo dell'operatore, e quelle **casuali**.

Matematicamente si formula un'*ipotesi nulla* e la sua negazione, detta anche *ipotesi alternativa*. La prima afferma che tutti i gruppi hanno la stessa media e quindi non vi è una correlazione tra l'appartenenza ad un gruppo ed il risultato (in altre parole, eventuali differenze osservate tra i gruppi sono solo dovute al caso); la seconda dichiara che c'è un'influenza dei fattori sul risultato, quindi questi sono significativi.

Per confrontare l'ipotesi alternativa e quella nulla viene valutata la varianza "all'interno dei gruppi" (*within*, in gergo) e "tra i gruppi"(*between*). Con la prima si determina l'entità della variazione dei dati dovuta alle fluttuazioni casuali, con la seconda la variabilità associata alla manipolazione sperimentale. Analisi statistiche di questo tipo associate a campagne di esperimenti sono supportate da software specifici. In questa sede si è fatto uso di Minitab \mathbb{B} che consente agevolmente di individuare i parametri \mathbb{R}^2 e **p-value** necessari per le valutazioni.

Il valore di R^2 rappresenta la proporzione della variabilità della risposta spiegata dall'equazione di regressione e può variare tra 0 e 1: un valore tanto più basso è sinonimo di non significatività dei risultati mentre uno più alto è da interpretare come la dipendenza della variabile che bene si spiega con i fattori di ingresso considerati. In realtà il software restituisce anche il valore di R^2 – corretto ed un valore di previsione: il primo è sensibile al numero di termini del modello ed è utile per confrontare diversi modelli quando tra essi varia il numero di fattori, il secondo quantifica in che percentuale il modello è in grado di prevedere una risposta in funzione di nuovi dati in ingresso.

Il p-value è un termine da valutare in funzione dell'intervallo di confidenza scelto. Entro tale intervallo si può essere ragionevolmente sicuri di non rifiutare erroneamente l'ipotesi nulla. In buona sostanza, posto un intervallo di confidenza pari al 95%, ogni p-value superiore a 0.05 indica che non può essere rifiutata l'ipotesi nulla.

3.2 Output della DOE

Allo scopo di determinare le migliori condizioni di processo per estendere la durata dello stampo si monitorano la tensione media, la tensione equivalente e l'usura per abrasione.

Il motivo delle variabili sopra indicate risiede, come anticipato precedentemente, nelle cause indicate in letteratura come le maggiori responsabili della dismissione degli stampi: la deformazione plastica e l'abrasione superficiale.

La deformazione plastica si verifica ogni qual volta si supera il limite di plasticità del materiale, o *snervamento*. Il carico di snervamento è caratteristico del materiale ma cambia in modo significativo con la temperatura, pertanto zone dove la temperatura dello stampo è alta per via del contatto con il materiale da deformare possono andare incontro ad una deformazione locale che potrebbe far eccedere le dimensioni del forgiato rispetto alle tolleranze previste. Per conoscere lo stato tensionale completo in ciascun punto dello stampo si monitora la tensione equivalente secondo l'ipotesi di Von Mises:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$
(3.1)

L'usura è un fenomeno complesso che può essere modellato in vari modi a seconda dell'evolversi del fenomeno; il modello più comunemente usato per stimare la quantità di materiale asportata è quello definito da Archard (nel quale figura la pressione che, a meno del segno, è equivalente alla tensione media: $\sigma_{media} = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = -p)$ ma esistono anche delle rielaborazioni dello stesso. In QForm è implementato il seguente modello di usura:

$$W_p = \int_0^t \frac{K_p \cdot p^a \cdot V_\tau^b}{\bar{\sigma}^a} dt; W_\tau = \int_0^t \frac{K_\tau \cdot \tau \cdot V_\tau}{\bar{\sigma}} dt$$
(3.2)

dove:

- W_{τ} è l'usura dovuta agli sforzi tangenziali, MPa;
- W_p è l'usura dovuta alla pressione normale, MPa;
- $K_{\tau} \in K_p$, così come $a \in b$, sono dei coefficienti empirici;
- V_{τ} è la velocità tangenziale all'interfaccia tra stampo e forgiato, m/s;
- *p* è la pressione normale nel punto di contatto, MPa;
- τ è lo sforzo di taglio nel punto di contatto, MPa;
- $\bar{\sigma}$ è la tensione di snervamento del materiale dello stampo, MPa;
- t è il tempo di contatto tra stampo e pezzo, s.

La variabile W_{τ} è quella monitorata nelle prove e restituisce immediatamente il valore di seguito identificato come *usura*. Questa formula corrisponde all'espressione di Archard [5] dove l'usura dello stampo è proporzionale alla pressione normale e alla distanza di strisciamento sul bordo tra stampo e forgiato e si ricava come segue:

1. Si stima l'usura per adesione considerando il contatto puntuale tra stampo e materiale deformato. Per ogni punto è possibile calcolare la potenza per le forze d'attrito

$$M_{\tau} = \tau \cdot v_{\tau} \tag{3.3}$$

con τ che segue l'espressione di Levanov (3.8).

2. La potenza associata alle forze d'attrito durante la formatura, nel momento in cui viene distrutto il film di adesione δ , è uguale alla potenza necessaria per deformare plasticamente i bordi di adesione dello stampo:

$$M_{\tau} = M_{\delta} \tag{3.4}$$

 M_{δ} è la potenza della deformazione plastica dei bordi di adesione δ aventi spessore Δ .
3. Secondo appositi studi sull'argomento [6] il valore dello spessore Δ è uguale alla distanza media tra le linee di scorrimento. Questo dipende dalle microasperità, dalla durezza dello stampo, dalla temperatura e dalla lavorazione dello stesso. La potenza della deformazione plastica del film δ è calcolabile come:

$$M_{\delta} = \bar{\sigma} \cdot \dot{\epsilon_v} \tag{3.5}$$

dove $\dot{\epsilon_v}$ è il rateo di deformazione volumetrico dello stesso film durante il danneggiamento. Per cui si deduce:

$$V_n = \dot{\epsilon_v} \cdot \Delta \tag{3.6}$$

4. Essendo V_n la velocità dei danni ai legami di adesione normale alla superficie ed essendo t il tempo di contatto, è possibile infine ricavare l'espressione di W_{τ} :

$$W_{\tau} = \int_0^t V_n dt \tag{3.7}$$

che altro non è che 3.2.

3.3 Definizione dei fattori e dei livelli

In questo caso studio sono stati dapprima valutati tutti i fattori che possono influenzare direttamente o indirettamente l'usura e la distribuzione delle tensioni nel processo di stampaggio a caldo. Tra i candidati più promettenti si annoverano il rapporto volume/superficie, la proporzione tra area di base e altezza della billetta di materiale, la tipologia di pressa, la velocità di deformazione, le temperature in gioco e la tipologia di lubrificante impiegato. Al termine di un'attenta valutazione sono stati scelti i seguenti fattori:

- altezza di ricalcatura della billetta,
- temperatura di riscaldamento degli stampi,
- coefficiente d'attrito del lubrificante.

3.3.1 Fattore 1: altezza di ricalcatura della billetta

Dal momento che la lavorazione in oggetto si svolge mediante due fasi intermedie e la tranciatura finale, è stata scelta come variabile l'altezza della billetta al termine della prima fase. Il motivo di tale decisione è stato non solo quello di considerare un aspetto geometrico per l'operazione di formatura, ma anche la possibilità, qualora si fosse rivelato un fattore determinante, di attuare facilmente una modifica al processo per beneficiare di un'estensione della vita utile dello stampo. La definizione dei livelli dell'altezza di ricalcatura ha richiesto un processo iterativo nel quale si è verificato che il riempimento dello stampo fosse completo in ogni punto e che durante la formatura non si verificassero difetti e pieghe che potessero pregiudicare le caratteristiche strutturali dello sbozzato e quindi la qualità del finito. Sono stati scartati i casi in cui le zone difettose identificate dal software erano estese mentre sono stati accettati quelli in cui si è attribuita l'esistenza del presunto difetto ad una mesh non adeguatamente fine. Altro motivo che ha fatto sì che eventuali zone (puntualmente) difettose fossero trascurate è stato il posizionamento delle stesse lungo le superfici con successiva lavorazione con asportazione di truciolo.

Nel seguito sono riportate delle immagini che mostrano dei casi significativi dei fenomeni spiegati.



Figura 3.2: Esempi di altezza di ricalcatura inadeguata

La conformazione dello stampo diviso in due parti fa sì che durante il processo si verifichi un cedimento dell'accoppiamento forzato tra anello e perno con conseguente formazione di uno scalino. Tale difetto è presente in ogni caso a prescindere dalla condizione di lavoro, tuttavia la sua presenza non costituisce un problema per il cliente, pertanto si ritiene accettabile.

Riassumendo, i livelli per il fattore altezza di ricalcatura sono quelli riportati in

seguito:

FATTORE 1:	h_{min}	h_{med}	h_{max}
altezza di ricalcatura, h [mm]	16	18	20

Tabella 3.1: Livelli del fattore h



Figura 3.3: Estremi dell'altezza di ricalcatura

3.3.2 Fattore 2: temperatura di riscaldamento stampi

Come si è visto nei precedenti paragrafi (1.3.2), la temperatura degli stampi assume un'importanza significativa per gli sforzi di deformazione e la riduzione della fatica termica, tuttavia non è da trascurare l'addolcimento del materiale che può avere delle controindicazioni in termini di usura e deformabilità dello stesso stampo. La pratica suggerisce un range di variazione che spazia dalla temperatura ambiente alla temperatura massima di circa 300°C, tuttavia, data la necessità di estendere l'intervallo a sufficienza per evidenziare dei legami con le grandezze monitorate, si è deciso di superare i limiti della pratica comune.

DOE

FATTORE 2:	T_{min}	T_{med}	T_{max}
temperatura stampi, T [°C]	20	210	400

Tabella 3.2: Livelli del fattore T

3.3.3 Fattore 3: coefficiente d'attrito del lubrificante

Il software QForm consente di scegliere il modello d'attrito che si preferisce e tra le varie opzioni permette la selezione del modello di Levanov che è quello usato per le simulazioni. La tensione tangenziale è quindi calcolata nel seguente modo:

$$\tau_{Levanov} = m \cdot \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 - e^{-n} \frac{\sigma_n}{\bar{\sigma}}\right)$$
(3.8)

nell'equazione compaiono:

- **m** coefficiente di attrito;
- $\bar{\sigma}$ tensione di snervamento del materiale che si deforma, MPa;
- σ_n tensione normale nel punto di contatto, MPa;
- **n** coefficiente di Levanov, (0<n<1.25, di default 1.25).

Il vantaggio di questo modello è quello di essere valido in ogni condizione possibile e non commettere delle grossolane approssimazioni per certe situazioni estreme: approssima bene il comportamento del modello di attrito Coulombiano per pressioni normali basse e ricalca altrettanto bene il modello d'attrito di Siebel per pressioni normali elevate [7].

Il coefficiente d'attrito nel modello cambia in modo sensibile a seconda del lubrificante scelto. Ancora una volta, per visualizzare una dipendenza nel modo più marcato possibile, si è scelto il range più vasto a disposizione tra la migliore lubrificazione e l'assenza della stessa. Nella tabella 3.3 è riportata la situazione riassuntiva per i suddetti livelli.

FATTORE 3:	m_{min}	m_{med}	m_{max}
coefficiente d'attrito, m [-]	0.15	0.4	0.8

Tabella 3.3: Livelli del fattore m

3.4 Definizione dei punti monitorati

Lo stampo studiato presenta una serie di aspetti che lo rendono tanto interessante come caso di studio quanto complicato. La frattura che si manifesta nell'uso industriale nel bordo di interfaccia tra le due porzioni dello stampo inferiore richiede un'attenta analisi per cercare di ridurre il fenomeno o quanto meno ritardarlo. Per questa ragione, tra la totalità dei punti monitorati, ne sono stati scelti alcuni nella zona danneggiata ed altri in zone strategiche dove le simulazioni preliminari hanno mostrato valori elevati di usura e sollecitazione. La Fig.3.4 mostra i punti scelti.



Figura 3.4: Punti dello stampo monitorati

Come è evidenziato dalla Fig.3.4 vi è una suddivisione tra due set di dati, per i quali è stato svolto il medesimo processo di analisi. I punti indicati come A, B, C, D sono stati i primi ad essere acquisiti perché ritenuti in prima battuta sufficienti per spiegare gli andamenti delle grandezze di interesse nei punti critici dello stampo. Una volta acquisiti i dati e post-processati ci si è ritrovati di fronte ad una situazione anomala per cui vi era l'impossibilità di trarre delle conclusioni. Per questo motivo sono stati acquisiti i punti d1, d2, d3, d4, d5 e d6, in zone altrettanto rilevanti.

DOE

Punto	Х	Y	Z
А	33.05	22.37	81.2
В	32.9	19.6	83.64
С	35	22.75	81.29
D	42.6	17.11	91.77
d1	50.0033	28.0342	99.7774
d2	43.9066	17.7168	97.5692
d3	34.3708	24.7514	81.2924
d4	31.4007	18.8111	86.5624
d5	27.4926	14.5903	86.7331
d6	14.8303	10.5259	86.7082

Tabella 3.4: Coordinate dei punti acquisiti

3.5 Elaborazione dei modelli

Elaborare un modello equivale a ricavare la relazione matematica che sussiste tra due o più variabili. Le grandezze output della DOE sono le variabili dipendenti dei modelli che si intendono ricavare, i fattori costituiscono le variabili indipendenti. Scelta una polinomiale del secondo ordine, i modelli cercati saranno nella forma:

$$y = \cos t + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2$$
(3.9)

con:

- cost l'intercetta del modello,
- X_1, X_2, X_3 le variabili indipendenti,
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ i coefficienti dei termini di primo ordine,
- $\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ i coefficienti dei termini di interazione,
- $\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ i coefficienti dei termini di secondo ordine.

I valori dei coefficienti non sono noti ed è necessario calcolarli con i dati a disposizione.

In questo studio, data la non linearità dei fenomeni in gioco e al fine di ottenere dei modelli più accurati e significativi, le relazioni sono state ricercate con termini di ordine primo e secondo. Tutti i dati ricavati sono stati elaborati con il software Minitab per svolgere l'analisi della varianza e per ottenere i modelli di regressione. Nei paragrafi successivi saranno riportati solo i modelli che consentono di svolgere delle analisi attendibili supportate da coefficienti di correlazione superiore all'85%.

3.5.1 Punto B

Tabella 3.5: Analisi della tensione equivalente in B

Tensione equivalente

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	196964	196964	549,96	0
Error	25	8954	358		
Total	26	205918			

Model Summary

\mathbf{S}	\mathbf{R} -sq	R-sq(adj)	$\mathbf{R} extsf{-sq}(\mathbf{pred})$
18,9247	$95,\!65\%$	$95,\!48\%$	94,82%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	$248,\!58$	7,12	34,89	0	
m	319	$13,\!6$	$23,\!45$	0	1

Regression Equation

Tensione equivalente [MPa]=248,58 + 319,0 m





Figura 3.5: Residui tensione equivalente in B

Osservando la tabella dell'analisi della varianza si nota come il p-value del parametro m sia molto basso, tanto da non presentare cifre diverse da 0 oltre la terza decimale. Questo è molto positivo ai fini dell'analisi considerando che un valore accettabile per definire dei risultati significativi è 0.05, ovvero un intervallo di confidenza del 95%.

Dai grafici dei residui si possono trarre alcune considerazioni che aiutano a giudicare la qualità del modello. In generale in nessun grafico deve essere visibile un trend e la distribuzione deve essere normale. Essendo i residui sparsi intorno allo zero nel Normal Probability Plot non si notano criticità e non sono evidenti tendenze. In merito al grafico Versus Fits si nota che i residui sono più o meno distribuiti omogeneamente intorno allo zero. Il grafico a istogramma non è di grande interesse dato il numero relativamente basso di dati, maggiore attenzione deve prestarsi al Versus Order che mostra la presenza di due outlier.

3.5.2 Punto C

Tabella 3.6: Analisi della tensione equivalente in C

Tensione equivalente

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	$\operatorname{Adj} \operatorname{MS}$	F-Value	P-Value
Т	1	52453	52453	$2,\!53$	0,126
\mathbf{m}	1	113500	113500	$5,\!49$	0,029
\mathbf{h}	1	609467	609467	$29,\!45$	0
h*h	1	683231	683231	$33,\!02$	0
m*h	1	93828	93828	$4,\!53$	0,045
Error	21	434525	20692		
Total	26	4990137			

Model Summary

\mathbf{S}	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
143,846	$91,\!29\%$	89,22%	85,14%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-23203	4756	-4,88	0	
\mathbf{T}	-0,284	$0,\!178$	-1,59	$0,\!126$	1
m	2681	1145	2,34	0,029	122,5
h	2874	530	$5,\!43$	0	$975,\!83$
h*h	-84,4	14,7	-5,75	0	973
m*h	-134,8	$63,\!3$	-2,13	$0,\!045$	$125,\!33$

Regression Equation

Tensione equivalente [MPa]=-23203 - 0,284 T + 2681 m + 2874 h - 84,4 h*h - 134,8 m*h

Il modello ricavato per la tensione equivalente comprende, tra gli altri, anche il parametro T che ha un p-value calcolato superiore a 0.05. Questo indica che non ci sono abbastanza evidenze per concludere che tale parametro sia effettivamente legato alla risposta. I grafici dei residui indicano che non ci sono problemi particolari al modello se non un outlier ben visibile nel diagramma Versus Order.



Figura 3.6: Residui tensione equivalente in C

3.5.3 Punto D

Tabella 3.7: Analisi della tensione media in D

Tensione media

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	2041,2	$2041,\!17$	28,99	0
h	1	$1658,\! 6$	$1658,\!58$	$23,\!56$	0
m*m	1	2048,4	2048,4	29,09	0
h*h	1	1621,5	$1621,\!48$	$23,\!03$	0
$T^{*}m$	1	650,2	650, 19	9,23	0,006
m*h	1	$472,\! 6$	$472,\!56$	6,71	0,017
Error	20	1408,2	$70,\!41$		
Total	26	11661, 1			

Model Summary

\mathbf{S}		\mathbf{R} -sq	$\mathbf{R} ext{-sq}(\mathbf{adj})$	$\mathbf{R}\operatorname{-sq}(\mathbf{pred})$
	8,39107	$87,\!92\%$	$84,\!30\%$	$73,\!54\%$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-1573	277	-5,67	0	
m	-403,1	74,9	-5,38	0	$154,\!07$
\mathbf{h}	149,9	30,9	4,85	0	$975,\!83$
m*m	186,4	$34,\!6$	$5,\!39$	0	$32,\!09$
h*h	-4,11	0,856	-4,8	0	973
T^*m	0,0604	0,0199	3,04	0,006	$1,\!48$
m*h	9,57	$3,\!69$	2,59	0,017	$125,\!33$

Regression Equation

Tensione media [MPa]=-1573 - 403,1 m + 149,9 h + 186,4 m*m - 4,110 h*h + 0,0604 T*m+ 9,57 m*h

Dai grafici in Fig.3.7 non emergono problemi. La distribuzione dei residui è normale.



Figura 3.7: Residui tensione media in D

Tabella 3.8: Analisi della tensione equivalente in D

Tensione equivalente

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	6103	6103	2,94	0,102
\mathbf{h}	1	17204	17204	8,28	0,009
m*m	1	42949	42949	$20,\!68$	0
h*h	1	14177	14177	$6,\!83$	0,017
$T^{*}h$	1	24227	24227	$11,\!66$	0,003
m*h	1	6353	6353	$3,\!06$	0,096
Error	20	41541	2077		
Total	26	680047			

Model Summary

\mathbf{S}		R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	$45,\!5744$	$93,\!89\%$	$92,\!06\%$	$89,\!25\%$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	5875	1507	3,9	0,001	
m	696	406	1,71	0,102	$153,\!59$
h	-483	168	-2,88	0,009	$975,\!84$
m*m	-854	188	-4,55	0	32,09
h*h	$12,\!15$	$4,\!65$	$2,\!61$	0,017	973
$T^{*}h$	-0,0107	0,00313	-3,42	0,003	1,01
m*h	35,1	20,1	1,75	0,096	$125,\!33$

Regression Equation

Tensione equivalente [MPa]=5875 + 696 m - 483 h - 854 m*m + 12,15 h*h - 0,01068 T*h + 35,1 m*h

Anche in questo modello sono da tenere in considerazione i valori di p-value di $m \in m^*h$ che superano 0.05. Considerare questi termini comporta, come più volte ripetuto, il rischio che in realtà non abbiano alcuna correlazione con la risposta. Il motivo per cui non si agisce altrimenti è che non sono stati trovati modelli alternativi migliori, pertanto, se in fase di verifica del modello questo dovesse rivelarsi inaffidabile, si saprebbe a chi imputare almeno parte delle responsabilità. Anche i residui diagrammati rispetto ai "fits" mostrano degli andamenti che non troppo bene rispettano la definizione di "distribuzione normale". In conclusione, da quanto visto finora, è lecito dubitare della qualità di questo modello.



Figura 3.8: Residui tensione equivalente in D

Tabella 3.9: Analisi dell'usura in D

Usura

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	0,002558	0,002558	166, 95	0
m*m	1	0,000308	0,000308	$20,\!14$	0
h*h	1	0,00007	0,00007	4,56	0,044
m*h	1	0,00186	0,00186	$121,\!41$	0
Error	22	0,000337	0,000015		
Total	26	0,013223			

Model Summary

\mathbf{S}		R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	0,00391	$97,\!45\%$	96,99%	$96,\!28\%$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,03968	0,00871	4,55	0	
m	$0,\!45$	0,0348	12,92	0	$153,\!24$
m*m	-0,0723	0,0161	-4,49	0	$32,\!09$
h*h	-5E-05	0,000025	-2,14	0,044	3,81
m*h	-0,019	0,00172	-11,02	0	$124,\!96$

Regression Equation

Usura [um]=0,03968 + 0,4500 m - 0,0723 m*m - 0,000053 h*h - 0,01896 m*h





Figura 3.9: Residui usura in D

3.5.4 Punto d1

Tabella 3.10: Analisi della tensione media in d1

Tensione media

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	7694	7694,3	$53,\!21$	0
m*m	1	1450	1450,1	10,03	0,004
T^*m	1	1658	1658	$11,\!47$	0,003
m*h	1	3161	3161,1	21,86	0
Error	22	3181	$144,\! 6$		
Total	26	30819			

Model Summary

\mathbf{S}		\mathbf{R} -sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	12,0252	$89,\!68\%$	87,80%	81,85%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-209,9	$9,\!29$	-22,59	0	
m	-505,8	69,3	-7,29	0	$64,\!33$
m*m	156,8	49,5	$3,\!17$	0,004	32,09
T^*m	0,0965	0,0285	$3,\!39$	0,003	$1,\!48$
m*h	$12,\!65$	2,71	$4,\!68$	0	32,76

Regression Equation

Tensione media [MPa]=-209,90 - 505,8 m + 156,8 m*m + 0,0965 T*m + 12,65 m*h





Figura 3.10: Residui tensione media in d1

Tabella 3.11: Analisi della tensione equivalente in d1

Tensione equivalente

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	43958	43958,2	$50,\!38$	0
\mathbf{h}	1	7436	$7435,\! 6$	8,52	0,008
m*m	1	11433	11433,1	13,1	0,002
$T^{*}m$	1	18552	$18551,\!8$	21,26	0
Error	22	19195	$872,\!5$		
Total	26	312715			

Model Summary

\mathbf{S}		\mathbf{R} -sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	$29,\!5379$	$93,\!86\%$	92,75%	89,90%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	847,8	66,7	12,71	0	
m	860	121	7,1	0	$32,\!57$
h	-10,16	$3,\!48$	-2,92	0,008	1
m*m	-440	122	-3,62	0,002	32,09
T^*m	-0,3227	$0,\!07$	-4,61	0	$1,\!48$

Regression Equation

Tensione equivalente [MPa]=847,8 + 860 m - 10,16 h - 440 m*m - 0,3227 T*m





Figura 3.11: Residui tensione equivalente in d1

Tabella 3.12: Analisi dell'usura in d1

Usura

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	0,00201	0,00201	$169,\!54$	0
\mathbf{h}	1	0,00033	0,00033	28	0
h*h	1	0,00031	0,00031	$26,\!51$	0
m*h	1	0,00262	0,00262	$221,\!03$	0
Error	22	0,00026	1,2E-05		
Total	26	0,01266			

Model Summary

\mathbf{S}		R-sq	R-sq(adj)	$\operatorname{R-sq}(\operatorname{pred})$
	0,00344	$97,\!94\%$	$97,\!57\%$	96,79%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,619	0,114	5,44	0	
m	-0,3567	0,0274	-13,02	0	122,5
\mathbf{h}	-0,0671	0,0127	-5,29	0	$975,\!83$
h*h	0,00181	0,00035	$5,\!15$	0	973
m*h	0,02254	0,00152	$14,\!87$	0	$125,\!33$

Regression Equation

Usura [um]=0,619 - 0,3567 m - 0,0671 h + 0,001809 h*h + 0,02254 m*h





Figura 3.12: Residui usura in d1

3.5.5 Punto d2

Tabella 3.13: Analisi della tensione media in d2

Tensione media

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	2428,3	2428,3	24,22	0
\mathbf{h}	1	454,3	454,3	4,53	0,045
m*m	1	2021,3	2021,3	20,16	0
T^*m	1	794,3	794,3	7,92	$0,\!01$
m*h	1	$313,\!8$	$313,\!8$	$3,\!13$	$0,\!091$
Error	21	2105,3	100,3		
Total	26	31722,1			

Model Summary

\mathbf{S}		\mathbf{R} -sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	10,0126	$93,\!36\%$	$91,\!78\%$	88,26%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-313,5	42,3	-7,42	0	
m	-439,7	89,3	-4,92	0	$154,\!07$
h	4,91	$2,\!31$	$2,\!13$	$0,\!045$	$3,\!83$
m*m	185,2	41,2	$4,\!49$	0	32,09
T*m	0,0668	0,0237	2,81	$0,\!01$	$1,\!48$
m*h	$7,\!8$	4,41	1,77	0,091	$125,\!33$

Regression Equation

Tensione media [MPa]=-313,5 - 439,7 m + 4,91 h + 185,2 m*m + 0,0668 T*m + 7,80 m*h





Figura 3.13: Residui tensione media in d2

Tabella 3.14: Analisi della tensione equivalente in d2

Tensione equivalente

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	95330	95330	$50,\!47$	0
\mathbf{h}	1	36185	36185	19,16	0
m*m	1	29150	29150	$15,\!43$	0,001
T^*m	1	26789	26789	$14,\!18$	$0,\!001$
Error	22	41551	1889		
Total	26	619176			

Model Summary

\mathbf{S}		\mathbf{R} -sq	R-sq(adj)	$\operatorname{R-sq}(\operatorname{pred})$
	43,459	$93,\!29\%$	$92,\!07\%$	88,91%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1386,4	98,1	14,13	0	
m	1267	178	7,1	0	$32,\!57$
h	-22,42	$5,\!12$	-4,38	0	1
m*m	-703	179	-3,93	0,001	32,09
T^*m	-0,388	$0,\!103$	-3,77	$0,\!001$	$1,\!48$

Regression Equation

Tensione equivalente [MPa]=1386,4 + 1267 m - 22,42 h - 703 m*m - 0,388 T*m





Figura 3.14: Residui tensione equivalente in d2

3.5.6 Punto d4

Tabella 3.15: Analisi della tensione media in d4

Tensione media

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	41101	41100,6	44,5	0
\mathbf{h}	1	7762	7762,4	8,4	0,008
m*m	1	13484	13484,1	$14,\! 6$	0,001
T^*m	1	15825	$15824,\!8$	$17,\!13$	0
Error	22	20320	$923,\! 6$		
Total	26	235854			

Model Summary

\mathbf{S}		\mathbf{R} -sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	30,3912	$91,\!38\%$	89,82%	85,47%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-702,3	$68,\! 6$	-10,24	0	
m	-832	125	-6,67	0	$32,\!57$
h	$10,\!38$	$3,\!58$	2,9	0,008	1
m*m	478	125	$3,\!82$	0,001	32,09
T^*m	$0,\!298$	0,072	$4,\!14$	0	$1,\!48$

Regression Equation

Tensione media [MPa]=-702,3 - 832 m + 10,38 h + 478 m*m + 0,2980 T*m





Figura 3.15: Residui tensione media in d4

Tabella 3.16: Analisi della tensione equivalente in d4

Tensione equivalente

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	7066	7066,38	$91,\!35$	0
\mathbf{h}	1	278	277,72	$3,\!59$	0,071
m*m	1	526	$525,\!95$	$6,\!8$	0,016
h*h	1	215	214,91	2,78	$0,\!11$
Error	22	1702	$77,\!35$		
Total	26	127712			

Model Summary

\mathbf{S}		\mathbf{R} -sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	8,79514	$98,\!67\%$	$98,\!43\%$	97,99%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	783	289	2,71	0,013	
m	$342,\!3$	$35,\!8$	9,56	0	32,09
h	-61,3	$32,\!3$	-1,89	0,071	973
m*m	-94,5	36,2	-2,61	0,016	32,09
h*h	$1,\!496$	$0,\!898$	$1,\!67$	$0,\!11$	973

Regression Equation

Tensione equivalente [MPa]=783 + 342,3 m - 61,3 h - 94,5 m*m + 1,496 h*h





Figura 3.16: Residui tensione equivalente in d4

Tabella 3.17: Analisi dell'usura in d
4 $\,$

Usura

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m*h	1	$0,\!05513$	$0,\!055125$	487,64	0
Error	25	0,00283	0,000113		
Total	26	0,05795			

Model Summary

\mathbf{S}		\mathbf{R} -sq	R-sq(adj)	$\operatorname{R-sq}(\operatorname{pred})$	
	0,01063	$95{,}12\%$	$94{,}93\%$	$94{,}52\%$	

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	0,07687	0,00396	19,43	0		
m*h	0,00923	0,00042	22,08	0		1

Regression Equation

Usura [um]=0,07687 + 0,009233 m*h





Figura 3.17: Residui usura in d4

3.5.7 Punto d5

Tabella 3.18: Analisi della tensione media in d5

Tensione media

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	30887	30887,4	43,86	0
\mathbf{h}	1	6624	6623,7	$9,\!41$	0,006
m*m	1	9601	9601,5	$13,\!63$	0,001
T^*m	1	14491	14490,9	$20,\!58$	0
Error	22	15493	704,2		
Total	26	185570			

Model Summary

\mathbf{S}		\mathbf{R} -sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	26,5373	$91,\!65\%$	$90,\!13\%$	$85,\!95\%$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-740,2	$59,\!9$	-12,35	0	
m	-721	109	-6,62	0	$32,\!57$
h	$9,\!59$	$3,\!13$	$3,\!07$	0,006	1
m*m	404	109	$3,\!69$	0,001	32,09
T^*m	0,2852	0,0629	$4,\!54$	0	$1,\!48$

Regression Equation

Tensione media [MPa]=-740,2 - 721 m + 9,59 h + 404 m*m + 0,2852 T*m





Figura 3.18: Residui tensione media in d5

Tabella 3.19: Analisi della tensione equivalente in d5

Tensione equivalente

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	3826	3826,3	$78,\!52$	0
\mathbf{h}	1	1007	1007,08	$20,\!67$	0
m*m	1	871	871,5	$17,\!88$	0
$h^{*}h$	1	905	904,5	$18,\!56$	0
T^*m	1	311	$310,\!64$	$6,\!37$	0,02
m*h	1	173	172,74	$3,\!54$	0,074
Error	20	975	48,73		
Total	26	208004			

Model Summary

\mathbf{S}		\mathbf{R} -sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	$6,\!98087$	99,53%	$99,\!39\%$	$99,\!19\%$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1408	231	6,1	0	
m	552	62,3	8,86	0	$154,\!07$
\mathbf{h}	-116,8	25,7	-4,55	0	$975,\!83$
m*m	-121,6	28,8	-4,23	0	32,09
h*h	$3,\!07$	0,712	$4,\!31$	0	973
T^*m	-0,0418	0,0165	-2,52	0,02	$1,\!48$
m*h	-5,79	$3,\!07$	-1,88	0,074	$125,\!33$

Regression Equation

Tensione equivalente [MPa]=1408 + 552,0 m - 116,8 h - 121,6 m*m + 3,070 h*h - 0,0418 T*m - 5,79 m*h





Figura 3.19: Residui tensione equivalente in d5
Tabella 3.20: Analisi dell'usura in d5

Usura

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}		Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m		1	0,00013	0,000128	13,92	0,001
\mathbf{h}		1	0,00012	$0,\!000115$	$12,\!48$	0,002
$h^{*}h$		1	0,00012	0,000124	$13,\!44$	$0,\!001$
T^*m		1	0,00029	0,000289	$31,\!32$	0
m*h		1	0,00305	0,003049	330,8	0
Error	2	21	0,00019	0,000009		
Total	2	26	0,23227			

Model Summary

\mathbf{S}		R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	0,00304	$99{,}92\%$	$99{,}90\%$	$99,\!84\%$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-0,337	$0,\!1$	-3,36	0,003	
m	-0,0903	0,0242	-3,73	0,001	$122,\!98$
\mathbf{h}	$0,\!0395$	0,0112	$3,\!53$	0,002	$975,\!83$
h*h	-0,00114	0,00031	-3,67	0,001	973
T^*m	-0,00004	7E-06	-5,6	0	$1,\!48$
m*h	0,02431	0,00134	18, 19	0	$125,\!33$

Regression Equation

Usura [um]=-0,337 - 0,0903 m + 0,0395 h - 0,001136 h*h - 0,000040 T*m + 0,02431 m*h





Figura 3.20: Residui usura in d5

3.5.8 Punto d6

Tabella 3.21: Analisi della tensione equivalente in d6

Tensione equivalente

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m	1	48734	48734,4	160,29	0
h	1	1654	$1653,\! 6$	$5,\!44$	0,03
m^*m	1	6901	6901, 1	22,7	0
$h^{*}h$	1	1398	1398,2	4,6	0,044
T^*m	1	2792	2791,5	$9,\!18$	0,007
$T^{*}h$	1	714	$713,\! 6$	$2,\!35$	$0,\!141$
Error	20	6081	304		
Total	26	591860			

Model Summary

\mathbf{S}	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
$17,\!4365$	$98,\!97\%$	$98,\!66\%$	$98,\!17\%$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1925	573	3,36	0,003	
m	$923,\!8$	73	$12,\!66$	0	$33,\!88$
h	-149,5	64,1	-2,33	0,03	$973,\!06$
m^*m	-342,1	71,8	-4,76	0	32,09
h*h	$3,\!82$	1,78	$2,\!14$	0,044	973
T^*m	-0,2421	0,0799	-3,03	0,007	$5,\!53$
T*h	$0,\!00355$	0,00231	$1,\!53$	0,141	3,8

Regression Equation

Tensione equivalente [MPa]=1925 + 923,8 m - 149,5 h - 342,1 m*m + 3,82 h*h - 0,2421 T*m + 0,00355 T*h





Figura 3.21: Residui tensione equivalente in d6

Tabella 3.22: Analisi dell'usura in d6

Usura

Analysis of Variance

Source	\mathbf{DF}		Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
m		1	0,000327	0,000327	$29,\!55$	0
m^*m		1	0,000921	0,000921	$83,\!23$	0
h*h		1	0,000028	0,000028	$2,\!51$	$0,\!128$
T^*m		1	0,000063	0,000063	$5,\!66$	0,027
$m^{*}h$		1	0,000542	0,000542	49,02	0
Error	2	21	0,000232	0,000011		
Total	2	6	0,097712			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,003326	99,76%	$99{,}71\%$	$99{,}65\%$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-0,01654	0,0074	-2,23	0,036	
m	0,1611	0,0296	$5,\!44$	0	153,72
m^*m	-0,125	0,0137	-9,12	0	32,09
$h^{*}h$	0,000034	0,000021	1,58	0,128	$3,\!81$
T^*m	-1,9E-05	0,000008	-2,38	0,027	$1,\!48$
m*h	0,01024	0,00146	7	0	$124,\!96$

Regression Equation

Usura [um]=-0,01654 + 0,1611 m - 0,1250 m*m + 0,000034 h*h - 0,000019 T*m + 0,01024 m*h





Figura 3.22: Residui usura in d6

3.6 Ottimizzazione dei parametri

Una volta ottenuti i modelli ed analizzata la tabella dell'ANOVA, così come i grafici dei residui, sono stati cercati i valori ottimali dei parametri, in particolare:

- il minimo valore locale di usura,
- il minimo valore locale della tensione equivalente,
- il massimo (dato il segno negativo dovuto allo stato di compressione dello stampo) per la tensione media.

Per conseguire il risultato si è fatto riferimento allo strumento *Response optimizer* di Minitab. Di seguito sono riportati i risultati.

3.6.1 Ottimizzazione in B

Tabella 3.23: Tensione equivalente ottima in B

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		275,591	548,335

Multiple Response Prediction

Variable	$\mathbf{Setting}$			
m Response	0,15 Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione equivalente [MPa]	296,43	5,47	(285,17; 307,70)	(255,86; 337,00)

3.6.2 Ottimizzazione in C

Tabella 3.24: Tensione equivalente ottima in C

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		$256,\!327$	1691,62

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!8$			
h	20			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione equivalente [MPa]	406,7	82	(236, 2;	(62,4;
			577,2)	751,0)

3.6.3 Ottimizzazione in D

Tabella 3.25: Tensione media ottima in D

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Tensione media [MPa]	Maximum	-327,565	-238,18	

Multiple Response Prediction

Variable	$\mathbf{Setting}$			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	$18,\!4242$			
Response	${f Fit}$	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione media [MPa]	-232,1	3,62	(-239,64;	- (-251,16; -
L			224,55)	213,04)

Tabella 3.26: Tensione equivalente ottima in D

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		1212,2	$1695,\!39$

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	$19,\!8384$			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione equivalente [MPa]	1183,2	24,5	(1132,1; 1234,4)	(1075,3; 1291,2)

Tabella 3.27: Usura ottima in D

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Usura [um]	Minimum		0,02273	0,101981
Multiple R Variable	tesponse Pre Setting	diction		
m	0,15			
Response	Fit	SE Fit	$95\%~{ m CI}$	95% PI
Usura [um]	0,02733	0,00193	(0,02333; 0,03132)	(0,01828; 0,03637)

Tabella 3.28: Ottimizzazione globale in D

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Usura [um]	Minimum		0,02	0,1
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		1212,2	1695,4
Tensione media [MPa]	Maximum	-327,565	-238,18	

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	$19,\!6364$			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Usura [um]	0,02913	0,00173	(0,02555;	(0,02026;
			0,03271)	0,03800)
Tensione equivalente [MPa]	1183,7	$23,\!3$	(1135, 1;	(1076, 9;
			1232,2)	1290,4)
Tensione media [MPa]	-238,23	3,75	(-246,05; -	(-257,40; -
			$230,\!41)$	219,06)

3.6.4 Ottimizzazione in d1

Tabella 3.29: Tensione media ottima in d1

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Tensione media [MPa]	Maximum	-372,23	-236,237	

Multiple Response Prediction

Variable	$\mathbf{Setting}$			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	20			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione media [MPa]	-238,48	4,17	(-247,13;	- (-264,88; -
			229,83)	212,09)

Tabella 3.30: Tensione equivalente ottima in d1

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		745,4	1147

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	20			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione equivalente [MPa]	744,3	12,2	(719,0;	(678,0;
			769,7)	810,6)

Tabella 3.31: Usura ottima in d1

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	
Usura [um]	Minimum		0,006126	0,082849	

Variable	Setting			
m h	$0,15 \\ 17,6162$			
_				
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI

Tabella 3.32: Ottimizzazione globale in d1

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Usura [um]	Minimum		0,006	0,08
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		$745,\!355$	$1147,\!26$
Tensione media [MPa]	Maximum	-372,23	-236,237	

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	18,5051			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Usura [um]	0,00616	0,00134	(0,00337;	(-0,00151;
			0,00894)	0,01382)
Tensione equivalente [MPa]	759,5	10,2	(738, 4;	(694, 7;
			780,7)	824,3)
Tensione media [MPa]	-241,32	4,09	(-249,81; -	(-267,66; -
			$232,\!83)$	214,97)

3.6.5 Ottimizzazione in d2

Tabella 3.33: Tensione media ottima in d2

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	\mathbf{Upper}
Tensione media [MPa]	Maximum	-383,125	-246,373	

Multiple Response Prediction

Variable	$\mathbf{Setting}$			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	20			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione media [MPa]	-249,67	4,92	(-259,89;	- (-272,87; -
			239,45)	226,48)

Tabella 3.34: Tensione equivalente ottima in d2

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	\mathbf{Upper}
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		1093, 16	$1672,\!49$

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	20			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione equivalente [MPa]	1088,9	18	(1051,6; 1126,2)	(991,4; 1186,5)

Tabella 3.35: Ottimizzazione globale in d2

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		1093, 16	1672,49	
Tensione media [MPa]	Maximum	-383,125	-246,37		

Variable	Setting	_		
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	20			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione equivalente [MPa]	1088,9	18	(1051, 6;	(991,4;
Tensione media [MPa]	-249,67	4,92	$\begin{array}{r} 1126,2) \\ (-259,89; \ -\\ 239,45) \end{array}$	$\begin{array}{c} 1186,5) \\ (-272,87; \\ 226,48) \end{array}$

3.6.6 Ottimizzazione in d4

Tabella 3.36: Tensione media ottima in d4

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Tensione media [MPa]	Maximum	-963,997	-604,394	

Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	20			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione media [MPa]	-590,7	12,6	(-616,8;	(-658,9;
			-564,6)	-522,5)

Tabella 3.37: Tensione equivalente ottima in d4

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		203,218	411,916

Variable	Setting			
m	0,15	_		
h	20			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione equivalente [MPa]	$205,\!68$	3,78	(197,83;	(185,82;

DOE

Tabella 3.38: Usura ottima in d4

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	
Usura [um]	Minimum		0,092559	0,229344	

Variable	Setting			
m	0,15			
h	16			
Response	${f Fit}$	${f SE}$ Fit	95% CI	$95\% \ \mathrm{PI}$
Response Usura [um]	Fit 0,09902	SE Fit 0,00314	95% CI (0,09255;	95% PI (0,07619;

Tabella 3.39: Ottimizzazione globale in d4

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Usura [um]	Minimum		0,093	0,229
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		203,218	411,916
Tensione media [MPa]	Maximum	$-963,\!997$	-604,394	

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	19,7172			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Usura [um]	$0,\!10417$	0,00297	(0,09806;	(0,08144;
			0,11028)	0,12691)
Tensione equivalente [MPa]	206,2	$3,\!44$	(199,06;	(186, 61;
			$213,\!33)$	225,78)
Tensione media [MPa]	-593,7	12	(-618,60; -	(-661,40; -
			568,7)	525,9)

3.6.7 Ottimizzazione in d5

Tabella 3.40: Tensione media ottima in d5

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Tensione media [MPa]	Maximum	-968,15	-641,623	

Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	20			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione media [MPa]	-630,3	11	(-653, 1;	(-689,9;
			-607,5)	-570,8)

Tabella 3.41: Tensione equivalente ottima in d5

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		$352,\!129$	613,054

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	$19,\!1919$			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione equivalente [MPa]	357,23	2,93	(351,11; 363,34)	(341,43; 373,02)

Tabella 3.42: Usura ottima in d5

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	
Usura [um]	Minimum		0,04773	0,311752	

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	16			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Usura [um]	0,04625	0,00146	(0,04321; 0,04929)	(0,03924; 0,05326)

Tabella 3.43: Ottimizzazione globale in d5

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Usura [um]	Minimum		0,048	0,312
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		$352,\!129$	$613,\!054$
Tensione media [MPa]	Maximum	-968, 15	$-641,\!623$	

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	$19,\!2727$			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Usura [um]	$0,\!05629$	0,00118	(0,05384;	(0,04952;
			0,05873)	0,06306)
Tensione equivalente [MPa]	$357,\!26$	2,94	(351, 12;	(341, 45;
			363,40)	373,06)
Tensione media [MPa]	-637,3	9,86	(-657,76; -	(-696,01; -
			616, 84)	$578,\!58)$

3.6.8 Ottimizzazione in d6

 Tabella 3.44:
 Tensione equivalente ottima in d6

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		$600,\!574$	1051,99

Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
Т	20			
m	$0,\!15$			
h	19,596			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensione equivalente [MPa]	592,43	9,51	(572,60; 612,27)	(551,00; 633,86)

Tabella 3.45: Usura ottima in d6

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Usura [um]	Minimum		0,036938	0,210623

Variable	Setting			
Т	400			
m	$0,\!15$			
h	16			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Usura [um]	0,03688	0,00161	(0,03353; 0,04023)	(0,02919; 0,04456)

Tabella 3.46: Ottimizzazione globale in d6

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper
Usura [um]	Minimum		0,037	0,21
Tensione equivalente [MPa]	Minimum		600,574	$1051,\!99$

Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
Т	20			
m	$0,\!15$			
h	18,101			
Response	\mathbf{Fit}	SE Fit	95% CI	95% PI
Usura [um]	0,04358	0,001	(0,04123;	(0,03628;
			0,04594)	0,05089)
Tensione equivalente [MPa]	600,75	$9,\!68$	(580, 55;	(559, 15;
			620,94)	642,35)

3.7 Analisi dei modelli

Per fare delle considerazioni sui dati raccolti con la campagna di esperimenti è opportuno, prima ancora di andare a esaminare i numeri, osservare i grafici con gli andamenti delle variabili. Questo consente agevolmente di cogliere se ci sono delle sostanziali differenze e, nel caso, discernere tra novità ed errore. Non è azzardato supporre che per una data variabile gli andamenti ed i modelli abbiano delle forti analogie, tuttavia è normale notare delle discrepanze nel passaggio tra punti appartenenti a zone dalle caratteristiche profondamente diverse (come il passaggio tra una superficie piana ad una curva o da orizzontale a verticale).

I grafici di seguito riportati sono da considerare suddivisi in due categorie: quelli che fanno riferimento al set di dati raccolto dalle simulazioni e quelli che fanno riferimento al modello di regressione calcolato. Tale distinzione si rende necessaria perché i primi, a meno di errori di misura e approssimazioni, ci trasmettono le informazioni che si constatano nel processo virtuale; i secondi sono frutto di una rielaborazione matematica e di un'analisi statistica che in quanto tale asserisce che i risultati che ne derivano sono corretti all'interno di un intervallo di confidenza prestabilito (nel nostro caso pari al 95%).



I grafici degli effetti principali e delle interazioni sono riferiti al set di dati, i diagrammi isolinee fanno riferimento al modello.

Figura 3.23: Grafici degli effetti principali per la tensione media

I grafici degli effetti principali sono suddivisi in tante parti per quanti sono i fattori considerati. Per ogni fattore sulle ordinate sono riportate le medie della grandezza in esame, sulle ascisse si trovano i livelli con cui si sono svolte le prove. Grazie a questa impostazione è possibile valutare il peso di ciascun fattore in funzione della pendenza delle linee e, caratteristica non meno importante, si identificano a colpo d'occhio le non linearità degli andamenti.

Nella Fig.3.23 si nota che il peso maggiore è attribuibile al coefficiente d'attrito e, in sequenza, all'altezza di ricalcatura e alla temperatura degli stampi. Si notano delle analogie negli andamenti tra i punti d1, d2, d4 e d5, mentre il punto D assume un comportamento in generale diverso: possiede un minimo per il coefficiente d'attrito ed un massimo per l'altezza h. Le differenze che si notano potrebbero essere imputabili alla posizione dei rispettivi punti (D è l'unico localizzato su una superficie verticale dello stampo).

Nel caso della tensione equivalente (Fig.3.24) il comportamento è omogeneo tra i punti D, d1, d2, d4, d5 e d6 in cui l'effetto dell'attrito è preponderante, la temperatura degli utensili incide in maniera minima (la tensione equivalente diminuisce per le temperature maggiori) e l'altezza ha una influenza maggiore nel tratto 16-18mm piuttosto che in quello 18-20mm. Per quanto riguarda il punto B, questo ha solo l'andamento rispetto ad m in comune con i precedenti, per il resto il trend della temperatura è minimamente crescente e l'altezza non ha praticamente ripercussioni sulla tensione (gli andamenti dovrebbero quanto meno essere paragonabili a quelli in d4, data la vicinanza dei punti). Il punto C è caratterizzato da un comportamento totalmente diverso dagli altri in quanto sia m che T hanno una minima influenza e il termine più importante è h. Dovendo decidere come agire per minimizzare la tensione equivalente sembra scontato seguire la "strada" indicata dai punti per cui i risultati siano concordi; tuttavia il punto C è quello situato in una zona molto critica in cui si manifesta una frattura, pertanto non si può escluderlo dalla fase di ottimizzazione. Fortunatamente, anche se con una significatività diversa rispetto agli altri casi, anche i grafici di C indicano che la scelta migliore è quella di optare per un lubrificante con un coefficiente di attrito minore ed un'altezza di ricalcatura maggiore.

I grafici mostrati in Fig.3.25 mostrano che il coefficiente d'attrito è il termine che determina in misura maggiore l'entità dell'usura per abrasione (come era lecito aspettarsi), la temperatura di riscaldamento degli stampi non ha una particolare influenza e l'altezza ha un comportamento che cambia in modo significativo a seconda del punto in esame. In generale si constata che per valori dell'altezza maggiori l'usura aumenta: in d5 e d6 l'andamento è quasi lineare in tutto il range, in d1 e d4 la significatività è limitata tra 16-18mm per poi crescere tra 18-20mm seppur con ratei differenti. Il punto D invece mostra un andamento dell'usura in funzione di h in controtendenza rispetto agli altri punti ed assume un peso maggiore rispetto al lubrificante. Questo andamento è indice del fatto che l'orientamento delle superfici rispetto alla direzione di stampaggio non solo è rilevante ma può costituire l'ago della bilancia in merito alle scelte dei parametri tecnologici: in questo modo si può dare priorità nella fase di progetto alle superfici che presentano

le maggiori criticità.



Figura 3.24: Grafici degli effetti principali per la tensione equivalente



Figura 3.25: Grafici degli effetti principali per l'usura



Figura 3.26: Grafici delle interazioni per la tensione media

Il grafico delle interazioni mostra, supposto costante il valore di un fattore, come varia la grandezza studiata al variare di un altro fattore. Quando le linee si intersecano significa che vi è interazione tra i fattori. In alcuni casi sono molto comodi per individuare i valori limite dei livelli per tenere sotto controllo una certa grandezza.

In Fig.3.26, esaminando la temperatura in relazione al coefficiente d'attrito, si nota come non sia praticamente influente sulla tensione media se il valore di m è

DOE



molto basso mentre apporta un modesto contributo con lubrificanti di media-bassa qualità.

Figura 3.27: Grafici delle interazioni per la tensione equivalente

Facendo riferimento ai grafici per la tensione equivalente in Fig.3.27 emerge con maggiore chiarezza il ruolo chiave svolto dal lubrificante e quello di minore rilievo (nell'ordine) di altezza di ricalcatura e temperatura: per ogni valore di m, qualsiasi valore sia assunto da T, esso risulta quasi del tutto indifferente. Variare l'altezza



influisce poco per i punti B, D, d1, d2, d4, d5 e d6, mentre cambia molto per C in misura uguale qualsiasi sia il valore di m.

Figura 3.28: Grafici delle interazioni per l'usura

I grafici delle interazioni per l'usura in Fig.3.28 ripetono i risultati trovati in precedenza ed aggiungono nel caso di d1 un'ulteriore informazione: all'aumentare dell'altezza di ricalcatura l'usura aumenta ma in un modo che è strettamente legato al valore di m. All'aumentare di h, l'aumento di m tende a far "esplodere" l'usura.



In questo caso specifico è fortemente consigliato lavorare con coefficienti d'attrito molto bassi per contenere il suddetto incremento.

Figura 3.29: Grafici isolinee per la tensione media

Considerando le espressioni dei modelli di regressione ricavati è evidente che i parametri m ed h sono quelli che permettono di avere maggior controllo sugli output del processo monitorati. Per questo motivo i diagrammi che seguono sono stati volutamente rappresentati dando priorità a queste grandezze. L'effetto ricercato è quello di riconoscere a colpo d'occhio le condizioni di lavoro più opportune. I grafici in Fig.3.29 mostrano che, per i punti d1, d2, d4 e d5, la distribuzione della tensione media rispetto ad un piano m-h è descritta da andamenti ellittici. In generale vale la regola che per massimizzare questa tensione bisogna prediligere alti valori di h e bassi di m. È anche evidente che non tutti i punti sono interessati agli stessi gradienti, pertanto in determinate zone la scelta di certi parametri può essere molto più determinante che in altre.

Per il punto D l'andamento delle isolinee è più complesso: la regione a forma di stella indica che non si possono riscontrare variazioni nella tensione se non si sceglie in modo oculato sia il tipo di lubrificante che l'altezza di ricalcatura, inoltre i gradienti sono elevati per cui sia le regioni di massima che di minima tensione sono confinati in uno stretto campo di valori.

Nei grafici in Fig.3.30 le considerazioni sono analoghe a quanto detto per la tensione media. In questo caso è necessario cercare il valore minimo della tensione che è comunque ottenuto per bassi valori di m ed alti di h. Le particolarità riscontrate per il punto D sono evidenti anche in questo caso. È interessante riscontrare per il punto d4, localizzato a ridosso di un raccordo esterno, il gradiente di tensione più elevato; ciò sottolinea il fatto che simili geometrie sono quelle che presentano le maggiori criticità.

L'usura è legata alla distanza di strisciamento tra pezzo e stampo pertanto, per ridurla, risulta più conveniente partire da una billetta di materiale che sia più prossima alla geometria finale. Per questo motivo i modelli ricavati ed i grafici in Fig.3.31 suggeriscono, oltre che alla assodata scelta di un buon lubrificante, di lavorare il più possibile la billetta in prima fase ed ottenere un valore di h minimo.





Contour Plot of Tensione equivalente [MPa] vs h; m



Contour Plot of Tensione equivalente [MPa] vs h; m



Contour Plot of Tensione equivalente [MPa] vs h; m



Figura 3.30: Grafici isolinee per la tensione equivalente

Contour Plot of Tensione equivalente [MPa] vs h; m



Contour Plot of Tensione equivalente [MPa] vs h; m



Contour Plot of Tensione equivalente [MPa] vs h; m





Figura 3.31: Grafici isolinee per l'usura

Capitolo 4 Verifica dei modelli

Con lo studio eseguito finora è stato possibile individuare delle espressioni matematiche abbastanza accurate da poter predire, nei dati punti, il valore delle grandezze esaminate al variare dei parametri T, m ed h. Tuttavia i modelli ricavati non sono ancora completi perché, pur ricalcando il comportamento delle simulazioni, i valori numerici non corrispondono ancora al caso reale. Questo perché durante l'esecuzione delle simulazioni, non essendo noto il coefficiente adimensionale del modello di Archard (1.4), questo è stato posto pari ad 1.

Per far collimare anche i valori numerici è necessario svolgere delle misure sullo stampo usurato e, noto il numero di battute eseguite e supponendo che il quantitativo di materiale asportato sia costante ad ogni ciclo, si risale al valore di K_{τ} facendo un confronto punto a punto.

Nei paragrafi successivi sono esposti maggiori dettagli in merito alle misurazioni ed ai coefficienti ricavati.

4.1 Misurazioni e calcolo del coefficiente K_{τ}

I rilievi sullo stampo dismesso sono stati svolti con uno scanner 3D per la reverse engineering. Viene fatto un confronto tra le dimensioni dello stampo usato rispetto ai valori nominali e si identificano delle aree che differiscono per entità dell'usura. La Fig. 4.1 mostra il confronto. A rigore, tale raffronto andrebbe eseguito tra le misure antecedenti e successive i cicli di lavoro in modo da escludere anche le disomogeneità introdotte dalla lavorazione dello stesso stampo.

Rispetto ai risultati che si otterrebbero utilizzando una macchina di misura a coordinate non è possibile quantificare in modo esatto l'usura per i punti simulati: i risultati delle simulazioni mostrano che in punti limitrofi a quelli considerati il valore di usura può differire anche in modo marcato, per questa ragione sarebbe più opportuno cercare di ottenere una misurazione ad-hoc per ciascun punto per Verifica dei modelli



Figura 4.1: Confronto stampo usurato con nominale

cui si intende misurare K_{τ} . Non potendo fare ciò e considerando accettabili le misure in prossimità dei punti di interesse (Fig. 3.4), i valori calcolati di K_{τ} potrebbero differire leggermente da quelli reali. Questo non costituisce un problema significativo per la committenza che ha come primario interesse la risoluzione delle cause della frattura e fornisce comunque un metodo valido per calcolare la durata massima teorica.

Tabella 4.1: Calcolo del K_{τ}

P.to	R-sq>85% (modello di usura)	Usura rilevata [mm]	Usura/ciclo reale* [mm/ciclo]	Usura/ciclo simulata [mm/ciclo]	$K_{ au}$
\mathbf{C}	NO	$0,\!16$	2,13E-05	7,03E-05	0,30
D	SI	$0,\!16$	2,13E-05	6,01E-05	$0,\!35$
d1	SI	$0,\!03$	4,00E-06	3,13E-05	$0,\!13$
d2	NO	$0,\!18$	2,40E-05	7,07E-05	$0,\!34$
d3	NO	$0,\!08$	1,07E-05	5,12E-05	$0,\!21$

*con l'ipotesi che la quantità di materiale asportata sia costante ad ogni ciclo
#cicli = 7500;

$$\frac{Usura}{ciclo}_{reale} = \frac{Usura\ rilevata}{\#cicli};$$

$$K_{\tau} = \frac{Usura/ciclo_{reale}}{Usura/ciclo_{simulata}}$$
(4.1)





Figura 4.2: Zone critiche soggette ad usura

Seguendo le indicazioni fornite dall'azienda, si focalizza l'attenzione sulle zone dove è necessario tenere sotto controllo la perdita globale della geometria, sia essa causata dalla deformazione o dall'usura. In Fig.4.2 le aree di maggiore interesse sono quella rossa e gialla che indicano, rispettivamente, dove l'usura deve essere minima (non sono previste ulteriori lavorazioni e il forgiato deve rispettare la condizione di massimo materiale) e dove è accettabile un valore maggiore. La zona verticale, oltre ad essere quella con il vincolo più rigoroso, è quella che presenta maggiore usura, pertanto la stima della durata viene effettuata tramite i dati riferiti al punto D.

Facendo riferimento alla condizione di massimo materiale ammissibile per la quota d'interesse (evidenziata in Fig. 4.3) e alla dimensione dello stampo nello stesso punto, tenute in conto le dilatazioni termiche, si deduce che la massima usura accettata è pari a circa 0.43mm. Con tale valore si calcola il massimo numero di battute ammissibili con i parametri non ottimizzati, pari a circa 9986.

Tabella 4.2: Determinazione dell'usura ammissibile

Temperatura media di lavoro: 400°C

$$\begin{array}{rcl} \alpha = & 1,42\text{E-}05 & {}^{o}C^{-1} \\ \Delta T = & 380 & {}^{o}C \end{array}$$

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta T)$$

	T_{amb}	T_{400}
$\Phi_{ext}[mm]$	218	218
$D_{chiave}[mm]$	$85,\!29$	$84,\!57$
	100 51	100.40
$\Phi_{ext} - D_{chiave}[mm]$	132.71	$133,\!43$
$\Delta L_{totale}[mm]$	0,72	
$Usura_{max}[mm]$	$0,\!43$	

Il valore calcolato è superiore al numero di cicli attualmente operati con questo stampo, ciò significa che (ammesso che si risolva il problema della frattura) potenzialmente lo stampo potrebbe estendere la sua durata di quasi un terzo. Nel paragrafo successivo, una volta noto l'errore introdotto dal modello di usura rispetto alle simulazioni, sarà calcolata una stima della durata con i valori ottimizzati dei parametri.

Le simulazioni mostrano che non vi è deformazione plastica sugli stampi ma solo elastica. Tuttavia non si può escludere la possibilità che il perdurare delle alte temperature diminuisca la resistenza alla deformazione nei cicli successivi al primo (quello simulato), pertanto si rende necessaria una simulazione nel tempo della temperatura e del limite di snervamento. Una volta noti i reali limiti dello stampo, si confronta il numero di cicli precedentemente calcolato con il tempo necessario perché il materiale perda le sue proprietà originali. Il valore inferiore determina la durata dello stampo.



Figura 4.3: Messa in tavola forgiato

4.2 Confronto tra valori simulati e calcolati

I modelli matematici ricavati in 3.5 hanno un range di validità confinato tra gli estremi dei fattori scelti per svolgere la DOE (3.3). I parametri qualitativi dei modelli sono già stati analizzati nell'apposito capitolo ma rimane da verificare come essi si comportino nel predire la data grandezza al variare dei fattori in ingresso. Per fare ciò si è deciso di utilizzare i parametri realmente usati dall'azienda per determinare dai modelli i valori *calcolati* e valutarne l'errore relativo rispetto al corrispondente *simulato*.

L'azienda attualmente produce scegliendo di riscaldare gli stampi alla temperatura di T=250°C, utilizzando un lubrificante a base di una soluzione di sali con coefficiente di attrito m=0.7 e ricalcando la billetta di materiale fino ad un'altezza h=18mm.

Tabella 4.3: Confronto tra valori calcolati e simulati

 $T=250^{\circ}C; m=0,7; h=18mm$

P.to B

Tensione equivalente [MPa]=248,58 + 319,0 m

Calcolato:	$471,\!88$	MPa
Simulato:	454,076	MPa
Errore:	$3,\!92\%$	

P.to C

Tensione equivalente [MPa]=-23203 - 0,284 T + 2681 m + 2874 h - 84,4 h*h - 134,8 m*h

Calcolato:	$1290,\!62$	MPa
Simulato:	1249,01	MPa
Errore:	$3{,}33\%$	

P.to D

Tensione media [MPa]=-1573 - 403,1 m + 149,9 h + 186,4 m*m - 4,110 h*h + 0,0604 T*m+ 9,57 m*h

Calcolato:	-266, 122	MPa
Simulato:	-273,088	MPa
Errore:	-2,55%	

Tensione equivalente [MPa]=5875 + 696 m - 483 h - 854 m*m + 12,15 h*h - 0,01068 T*h + 35,1 m*h

Calcolato:	$1580,\!54$	MPa
Simulato:	$1651,\!67$	MPa
Errore:	-4,31%	

Usura [um]=0,03968 + 0,4500 m - 0,0723 m*m - 0,000053 h*h - 0,01896 m*h

Calcolato:	0,063185	um
Simulato:	0,060126	um
Errore:	$5,\!09\%$	

P.to d1

Tensione media [MPa]=-209,90 - 505,8 m + 156,8 m
*m + 0,0965 T*m + 12,65 m*h

Calcolato:	-310,851	MPa
Simulato:	-304,364	MPa
Errore:	$2,\!13\%$	

Tensione equivalente [MPa]=847,8 + 860 m - 10,16 h - 440 m*m - 0,3227 T*m

Calcolato:	$994,\!8475$	MPa
Simulato:	$992,\!198$	MPa
Errore:	$0,\!27\%$	

Usura [um]=0,619 - 0,3567 m - 0,0671 h + 0,001809 h*h + 0,02254 m*h

Calcolato:	0,03163	um
Simulato:	0,03131	um
Errore:	$1,\!02\%$	

P.to d2

Tensione media [MPa]=-313,5 - 439,7 m + 4,91 h + 185,2 m*m + 0,0668 T*m + 7,80 m*h

Calcolato:	-332,192	MPa
Simulato:	-329,606	MPa
Errore:	0,78%	

Tensione equivalente [MPa]=1386,4 + 1267 m - 22,42 h - 703 m*m - 0,388 T*m

Calcolato:	$1457,\!37$	MPa
Simulato:	$1463,\!07$	MPa
Errore:	-0,39%	

P.to d4

Tensione media $[MPa] = -702,3 - 832 m + 10,3$	88 h		
$+ 478 \text{ m}^{*}\text{m} + 0.2980 1^{*}\text{m}$			
	Calcolato: Simulato: Errore:	-811,49 -804,262 0,90%	MPa MPa
Tensione equivalente [MPa]=783 + 342,3 m - 6 h - 94,5 m*m + 1,496 h*h	61,3		
	Calcolato: Simulato:	$357,\!609$ $345,\!653$	MPa MPa

Usura [um]=0,07687 + 0,009233 m*h

Calcolato:	$0,\!193206$	um
Simulato:	$0,\!178711$	um
Errore:	8,11%	

Errore: 3,46%

P.to d5

Tensione media [MPa]=-740,2 - 721 m + 9,59 h + 404 m*m + 0,2852 T*m

Calcolato: -824,41 MPa Simulato: -830,932 MPa Errore: -0,78%

Tensione equivalente [MPa]=1408 + 552,0 m - 116,8 h - 121,6 m*m + 3,070 h*h - 0,0418 T*m - 5,79 m*h

Calcolato:	$546,\!827$	MPa
Simulato:	$534,\!577$	MPa
Errore:	$2,\!29\%$	

Usura [um]=-0,337 - 0,0903 m + 0,0395 h - 0,001136 h*h - 0,000040 T*m + 0,02431 m*h

Calcolato:	0,242032	um
Simulato:	$0,\!242361$	um
Errore:	-0,14%	

P.to d6

Tensione equivalente [MPa]=1925 + 923,8 m - 149,5 h - 342,1 m*m + 3,82 h*h - 0,2421 T*m + 0,00355 T*h

Calcolato:	$924,\!3185$	MPa
Simulato:	$917,\!677$	MPa
Errore:	0,72%	

Usura [um]=-0,01654 + 0,1611 m - 0,1250 m*m + 0,000034 h*h - 0,000019 T*m + 0,01024 m*h

Calcolato:	$0,\!171695$	um
Simulato:	0,169166	um
Errore:	$1,\!49\%$	

Fine della tabella 4.3

Facendo riferimento ai risultati ricavati per l'usura nel punto D ed al calcolo di durata nel paragrafo precedente (4.1) è possibile fare una stima della maggiore durata possibile dello stampo.

Scegliendo i parametri ottimali per l'usura in D (Tab. 3.27) il quantitativo di materiale asportato equivale a 0,00962 μm al ciclo e la durata corrispondente è pari a 22156 battute.

Questo dato è sicuramente una stima in quanto si è visto che il modello di usura ricavato non è esente da errori ma sicuramente lascia ben sperare riguardo alla possibilità di prolungare l'attuale vita operativa di questo stampo: il valore calcolato è in linea con quelle che sono le durate medie degli utensili per stampaggio a caldo.

Capitolo 5

Conclusioni

Il lavoro svolto in questa Tesi aveva come obiettivo quello di trovare una causa alla frattura dello stampo e determinare i modelli matematici per predirne la durata. In merito al primo proposito si è giunti alla conclusione che la geometria del forgiato risulta particolarmente difficile da ottenere con i canoni della near-net-shape. Il prezzo da pagare per non svolgere lavorazioni successive ulteriori si ripercuote sulla durevolezza dello stampo. La scelta più prudente per estenderne la vita sarebbe quella di modificare la geometria a ridosso della zona fratturata cercando di aumentare i raggi di raccordo per ridurre la concentrazione degli sforzi. Scegliendo una strategia di produzione più *aggressiva* (che minimizzi i tempi di lavorazione) diventa necessario risolvere il problema in altro modo: dalle analisi micrografiche al microscopio SEM emergono le tracce del **fretting**, un fenomeno che insorge in presenza di minimi scorrimenti tra due pezzi accoppiati con notevoli pressioni. La soluzione a questo evento consiste nell'eliminare lo scorrimento, pertanto il suggerimento è quello di incrementare l'interferenza di accoppiamento tra perno ed anello. L'entità di tale incremento deve essere indagata con ulteriori calcoli e simulazioni onde evitare che si verifichino pericolose tensioni durante lo stampaggio.

In merito alla previsione di durata dello stampo è necessario mettere a confronto le zone dove si riscontrano i valori più alti di usura, tensione e temperatura: individuati i punti critici, si calcola il numero di battute prima che si raggiunga il valore limite per il dato meccanismo di danneggiamento, così come spiegato in 1.3.3 ed applicato in 4.1.

Si rende tuttavia indispensabile rimediare al problema della frattura che vanifica, almeno in parte, il lavoro svolto. Infatti la sostituzione dello stampo, ad oggi, si rende necessaria ben prima che l'usura e la deformazione plastica possano determinare la fine della vita operativa.

5.1 Vantaggi e svantaggi del modello

L'usura è un fenomeno molto complicato e caratterizzato da un andamento fortemente non lineare. I parametri che lo influenzano sono molteplici e la ricerca di un modello matematico che li contempli tutti appare utopistica.

In questo studio si è cercato di esprimere una correlazione con delle variabili la cui modulazione durante la produzione non comporta un sacrificio troppo grande da intraprendere dalla committenza. In particolare si è dimostrato come il lubrificante svolga un ruolo chiave e per il quale non bisogna lesinare. In generale, che si cerchi di minimizzare l'usura o il rischio di deformazione plastica, risulta indispensabile adottare il lubrificante migliore possibile. Il valore dell'altezza di ricalcatura, per quanto difficile da settare con precisione date le dilatazioni termiche in gioco, deve essere modulato in modo specifico in relazione ai due fenomeni.

Da questa analisi la temperatura di riscaldamento degli stampi non sembra influire in modo consistente, tuttavia bisogna essere consapevoli che questa considerazione è valida se non si tiene conto del regime termico degli stessi.

Il metodo proposto si rivela soddisfacente nei limiti dei punti considerati "buoni" dall'analisi statistica, come si evince dal paragone tra valori calcolati e simulati in 4.2. Tuttavia come procedura richiede un'importante dispendio di tempo e risorse per eseguire un numero adeguato di campionamenti e il modello calcolato non è universalmente valido. Il grande limite di questa procedura è quello di fare affidamento a delle grandezze che siano proprie del processo, come l'altezza di ricalcatura. Con l'obiettivo di generalizzare i risultati per qualsiasi stampo potrebbe essere opportuno scegliere come parametri delle caratteristiche universalmente misurabili e non solo riferibili al caso specifico. Nella fattispecie si è vista una forte dipendenza dell'usura dalla localizzazione del punto sullo stampo. Volendo quantificare il peso dell'orientamento della superficie (per ogni punto di cui si vuole stimare la durata ad usura) si potrebbe definire un coefficiente ad-hoc che esprima il rapporto tra la direzione di stampaggio e quella della superficie stessa.

Parlando di limiti, in questo metodo ne è stato fin da subito riscontrato uno nel calcolo del coefficiente di correlazione dei vari modelli: una serie di prove svolte al simulatore in condizioni di ripetibilità dei fattori "assoluta" avrebbe dovuto mostrare una variabilità non spiegata rasente lo zero. La causa di una variabilità così alta è stata attribuita a:

- **mesh**: viene ricalcolata dal software ad ogni passo ed è l'unico fattore soggetto a variazione oltre a *T*, *m* ed *h*;
- deformazione congiunta degli stampi: è un'impostazione che permette al software di calcolare la deformazione degli stampi durante il processo. Attivandola non è possibile mantenere costante il riferimento del punto preso a causa delle deformazioni che variano caso per caso;

• transizione da regime di trazione a quello di compressione: l'anello è calettato con forzamento sul perno e ciò induce nel primo uno stato di trazione. Sotto le sollecitazioni del processo si ha l'alternanza del segno delle tensioni che complica la ricerca del modello.

Nonostante questi aspetti negativi tale analisi permette di ottenere buoni risultati circa la previsione delle grandezze studiate. Purtroppo qualsiasi risultato è limitato al range dei valori con cui è stato condotto lo studio, pertanto risulta impossibile prevedere cosa accada al di fuori di tale intervallo e per punti diversi da quelli campionati. Tuttavia le analogie tra i modelli matematici permettono comunque di fare delle considerazioni qualitative e, non di meno, aprire la strada al raggiungimento di un modello generalizzato dell'usura.

5.2 Miglioramenti da apportare al modello

A complemento di questa analisi si rende necessario uno studio del regime termico dello stampo che permetta di determinare per ogni ciclo la durezza superficiale dello stesso. In tal modo si rivela effettivamente possibile mettere a paragone la criticità del fenomeno di usura rispetto a quella della deformazione plastica e prendere decisioni determinanti in fase di progetto.

In riferimento all'analisi svolta si ritene che la scelta fatta dei fattori T, $m \in h$ abbia permesso di fare emergere due elementi:

- 1. l'importanza di ciascun fattore nel processo,
- 2. l'importanza di condurre un'analisi facendo le dovute considerazioni.

Osservando i risultati è evidente che nello stampaggio ogni "problema" derivi dall'attrito, per cui è d'obbligo considerare il lubrificante; la geometria iniziale influisce molto sia sulla distribuzione dei carichi sia sullo sfregamento del materiale durante la formatura, pertanto è opportuno che si tenga conto di almeno un parametro geometrico. In riferimento alla temperatura, seppur il suo coinvolgimento sia documentato da ogni studio in letteratura, dai modelli ottenuti pochi hanno manifestato una correlazione con essa. Questo non vuole assolutamente significare che la temperatura non influisca sui fenomeni di danneggiamento ma che per vederne gli effetti è necessario fare riferimento ad un arco temporale più esteso. In questo modo si possono valutare gli effetti termici sulla durezza del materiale e quindi a ciò che una sua variazione comporta.

Una seconda miglioria consiste invece nell'abbandonare modelli matematici complessi e ricostruire per interpolazione il comportamento dello stampo. Questo metodo, noto come *kriging*, permette di interpolare una grandezza nello spazio minimizzando l'errore quadratico medio. Procedendo come svolto finora, utilizzando la regressione lineare, si andrebbe a stimare il valore di usura all'interno di un intervallo di cui sono noti gli estremi, se ne calcolerebbe lo scarto quadratico medio e, se quest'ultimo risultasse più grande rispetto ad un limite prefissato, si andrebbe a simulare il processo nello stesso punto. Iterando la procedura in tutto il range dei parametri scelti si giunge al compimento dell'analisi e l'ottenimento della risposta cercata, il digital twin.

Appendice A Risultati delle simulazioni

T0	m	h	Tensione	Tensione effet-	wear traction
			media [MPa]	tiva [MPa]	MAX [mm]
20	$0,\!15$	16	$33,\!815198$	964,782401	1,58E-05
20	$0,\!15$	18	$-201,\!68782$	448,28012	3,21E-05
20	$0,\!15$	20	-107,74418	656,910109	1,97E-05
20	0,4	16	-275,36271	591,187564	1,51E-05
20	$0,\!4$	18	-279,50807	558,788688	8,02E-06
20	$0,\!4$	20	-292,11939	$543,\!407423$	3,58E-05
20	$0,\!8$	16	$-358,\!35551$	836,24721	1,05E-05
20	$0,\!8$	18	$146,\!464899$	1248,89269	8,96E-06
20	0,8	20	-329,78644	$673,\!349884$	2,96E-06
210	$0,\!15$	16	198,146	1044,669	1,7447E-05
210	$0,\!15$	18	$-259,\!2919$	$543,\!543878$	3,53E-05
210	$0,\!15$	20	-105,991	$693,\!51845$	1,24E-05
210	0,4	16	-310,4678	$672,\!2896$	1,14E-05
210	$0,\!4$	18	-257,99008	495,317263	2,80E-05
210	0,4	20	$-277,\!35341$	$537,\!396121$	1,36E-05
210	$0,\!8$	16	-137,74316	$360,\!488849$	1,4072E-05
210	$0,\!8$	18	-223,8257	$515,\!915402$	$9,\!61E-06$
210	$0,\!8$	20	$-315,\!543$	$645,\!750635$	8,89E-06
400	$0,\!15$	16	-123,79784	$265,\!549852$	$1,\!67E-05$
400	$0,\!15$	18	-169,06691	337,119431	2,17E-05
400	$0,\!15$	20	-221,25822	400,160682	2,07E-05
400	0,4	16	-219,92692	$459,\!630697$	9,55E-06
400	0,4	18	-182,6115	389,0627	$1,\!84\text{E-}05$
400	0,4	20	-296,79986	661,787518	1,42E-05
400	0,8	16	226,227237	1220,83519	1,11E-05
400	0,8	18	-228,18599	463,23806	1,20E-05
400	0,8	20	$-267,\!21958$	558,563588	1,34E-05

Tabella A.1: Punto A

T0	m	h	Tensione	Tensione effet-	wear traction
			media [MPa]	tiva [MPa]	MAX [mm]
20	$0,\!15$	16	-631,893	$275{,}5908$	2,09E-05
20	$0,\!15$	18	-606,709	293,8894	9,24E-06
20	$0,\!15$	20	-596,308	294,934	2,89E-06
20	$0,\!4$	16	-808,503	$371,\!179$	1,51E-05
20	$0,\!4$	18	-757,012	370,6961	3,23E-06
20	0,4	20	$-744,\!664$	386,6313	4,08E-06
20	$0,\!8$	16	-982,46	495,3959	4,46E-05
20	$0,\!8$	18	-750,809	373,2703	2,50E-06
20	$0,\!8$	20	-864,162	487,6397	6,27E-06
210	$0,\!15$	16	-600,682	280,715	1,37E-05
210	$0,\!15$	18	-604,322	$288,\!1487$	6,90E-06
210	$0,\!15$	20	-579,803	$294,\!6352$	4,71E-06
210	$0,\!4$	16	-802,212	$373,\!6879$	6,82E-06
210	$0,\!4$	18	$-749,\!649$	372,8506	5,15E-06
210	0,4	20	-733,292	$397,\!1018$	5,59E-06
210	$0,\!8$	16	-759,111	$459,\!4547$	2,86E-05
210	$0,\!8$	18	-844,22	$548,\!3349$	7,40E-06
210	$0,\!8$	20	-865,884	$498,\!4795$	1,05E-05
400	$0,\!15$	16	-574,135	$321,\!0062$	1,55E-05
400	$0,\!15$	18	-561,969	289,5096	1,07E-05
400	$0,\!15$	20	-596,809	289,014	3,35E-06
400	0,4	16	-335,965	$413,\!3979$	1,08E-05
400	0,4	18	-649,305	$385,\!0487$	9,18E-06
400	$0,\!4$	20	-703,764	380,8821	6,02E-06
400	0,8	16	-748,173	496,7897	3,09E-05
400	0,8	18	-679,507	367,2894	1,01E-05
400	0,8	20	-827,197	528,7036	1,19E-05

Tabella A.2: Punto B

$\mathbf{T0}$	m	h	Tensione	Tensione effet-	wear traction
			media [MPa]	tiva [MPa]	MAX [mm]
20	$0,\!15$	16	$-253,\!37$	$1385,\!57$	2,84E-05
20	$0,\!15$	18	-238,178	1282,41	4,34E-05
20	$0,\!15$	20	-243,374	$1286,\!69$	2,28E-05
20	$0,\!4$	16	-289,963	1678,97	6,74E-05
20	$0,\!4$	18	-269,237	1486,8	5,91E-05
20	$0,\!4$	20	$-273,\!639$	$1481,\!15$	3,59E-05
20	$0,\!8$	16	-327,565	$1695,\!39$	0,000098
20	$0,\!8$	18	-266,092	1482,01	$5,\!65E-\!05$
20	$0,\!8$	20	-265,042	$1645,\!01$	2,71E-05
210	$0,\!15$	16	-252,131	$1363,\!45$	$4,\!84\text{E-}05$
210	$0,\!15$	18	-242,382	$1261,\!53$	4,04E-05
210	$0,\!15$	20	-239,012	$1254,\!62$	2,27E-05
210	$0,\!4$	16	-286,392	1666, 32	7,02E-05
210	$0,\!4$	18	-261,717	1441,48	0,000059
210	0,4	20	-275,993	$1433,\!68$	$3,\!62E-05$
210	$0,\!8$	16	-291,926	$1636,\!49$	0,000102
210	$0,\!8$	18	-258,571	$1607,\!99$	5,93E-05
210	$0,\!8$	20	-266,671	$1612,\!25$	$3,\!14\text{E-}05$
400	$0,\!15$	16	-260,493	1340,73	$4,\!39E-\!05$
400	$0,\!15$	18	-240,466	$1247,\!35$	3,93E-05
400	$0,\!15$	20	-239,97	1212,2	2,66E-05
400	0,4	16	$-293,\!307$	$1633,\!21$	0,000068
400	0,4	18	$-264,\!662$	1363,2	$5,\!82E-05$
400	$0,\!4$	20	-254,74	1380,65	3,37E-05
400	0,8	16	$-283,\!581$	1604,77	0,0001
400	0,8	18	-254,747	1392,92	5,55E-05
400	0,8	20	-254,083	1552,26	3,09E-05

Tabella A.3: Punto C

$\mathbf{T0}$	m	h	Tensione	Tensione effet-	wear traction
			media [MPa]	tiva [MPa]	MAX [mm]
20	$0,\!15$	16	$-253,\!37$	$1385,\!57$	2,84E-05
20	$0,\!15$	18	-238,178	1282,41	$4,\!34\text{E-}05$
20	$0,\!15$	20	-243,374	$1286,\!69$	2,28E-05
20	0,4	16	-289,963	1678,97	6,74E-05
20	0,4	18	-269,237	1486,8	5,91E-05
20	0,4	20	-273,639	1481,15	3,59E-05
20	0,8	16	-327,565	1695,39	0,000098
20	$0,\!8$	18	-266,092	1482,01	$5,\!65E-\!05$
20	$0,\!8$	20	-265,042	$1645,\!01$	2,71E-05
210	$0,\!15$	16	-252,131	$1363,\!45$	$4,\!84\text{E-}05$
210	$0,\!15$	18	-242,382	$1261,\!53$	4,04E-05
210	$0,\!15$	20	-239,012	$1254,\!62$	2,27E-05
210	$0,\!4$	16	-286,392	1666, 32	7,02E-05
210	$0,\!4$	18	-261,717	1441,48	0,000059
210	$0,\!4$	20	-275,993	$1433,\!68$	$3,\!62E-05$
210	$0,\!8$	16	-291,926	$1636,\!49$	0,000102
210	$0,\!8$	18	-258,571	1607,99	5,93E-05
210	$0,\!8$	20	-266,671	$1612,\!25$	$3,\!14\text{E-}05$
400	$0,\!15$	16	-260,493	1340,73	$4,\!39E-05$
400	$0,\!15$	18	-240,466	$1247,\!35$	3,93E-05
400	$0,\!15$	20	-239,97	1212,2	2,66E-05
400	$0,\!4$	16	$-293,\!307$	$1633,\!21$	0,000068
400	$0,\!4$	18	$-264,\!662$	1363,2	$5,\!82\text{E-}05$
400	$0,\!4$	20	-254,74	1380,65	3,37E-05
400	0,8	16	$-283,\!581$	1604,77	0,0001
400	0,8	18	-254,747	1392,92	5,55E-05
400	0,8	20	-254,083	1552,26	3,09E-05

Tabella A.4: Punto D

T0	m	h	Tensione	Tensione effet-	wear traction
			media [MPa]	tiva [MPa]	MAX [mm]
20	$0,\!15$	16	$-255,\!636$	793,606	6,34E-06
20	$0,\!15$	18	-246,169	783,283	8,73E-06
20	$0,\!15$	20	-244,639	784,873	1,56E-05
20	0,4	16	-314,341	975,559	1,23E-05
20	0,4	18	-282,098	913,087	1,87E-05
20	0,4	20	-283,333	914,186	3,72E-05
20	0,8	16	-372,23	1147,26	1,56E-05
20	0,8	18	-313,912	1037,91	3,24E-05
20	0,8	20	-304,85	1034,48	8,28E-05
210	0,15	16	-247,266	782,198	6,13E-06
210	$0,\!15$	18	-243,828	766,842	9,24E-06
210	$0,\!15$	20	-239,558	764,631	1,53E-05
210	0,4	16	-314,995	971,96	1,17E-05
210	0,4	18	-271,416	$885,\!379$	1,82E-05
210	0,4	20	-275,822	882,415	3,55E-05
210	$0,\!8$	16	-317,462	978,837	1,32E-05
210	$0,\!8$	18	-333,526	$1019,\!27$	$3,\!24\text{E-}05$
210	$0,\!8$	20	-302,632	1008, 49	7,75E-05
400	$0,\!15$	16	$-248,\!544$	$777,\!144$	6,17E-06
400	$0,\!15$	18	-243,365	$766,\!655$	8,87E-06
400	$0,\!15$	20	-236,237	$745,\!355$	1,31E-05
400	0,4	16	-309,109	$956,\!624$	1,11E-05
400	0,4	18	-270,787	846,832	1,71E-05
400	0,4	20	-269,141	856,482	3,40E-05
400	0,8	16	-307,181	$956{,}512$	1,18E-05
400	0,8	18	-295,383	$987,\!031$	3,11E-05
400	0,8	20	-294,156	982,946	7,84E-05

Tabella A.5: dot 1

T0	m	h	Tensione	Tensione effet-	wear traction
			media [MPa]	tiva [MPa]	MAX [mm]
20	$0,\!15$	16	$-269,\!637$	1182,24	6,34E-05
20	$0,\!15$	18	$-268,\!673$	$1159,\!35$	6,80E-05
20	$0,\!15$	20	-246,373	1131,41	8,37E-05
20	0,4	16	-330,848	1452,93	8,51E-05
20	0,4	18	-308,189	1344,3	6,87E-05
20	0,4	20	-299,05	1322,3	6,89E-05
20	0,8	16	-383,125	1672,49	9,86E-05
20	0,8	18	-332,438	1503,28	7,92E-05
20	0,8	20	-312,664	$1469,\!05$	8,77E-05
210	$0,\!15$	16	-273,211	1175,9	6,35E-05
210	0,15	18	$-257,\!307$	1133,38	7,26E-05
210	$0,\!15$	20	-259,083	1126,19	$7,\!31E-05$
210	0,4	16	-329,009	1445,71	7,67E-05
210	0,4	18	-303,304	1321,54	8,50E-05
210	$0,\!4$	20	-296,894	1283,01	7,77E-05
210	$0,\!8$	16	-347,054	$1437,\!03$	9,56E-05
210	$0,\!8$	18	-360,116	1498,8	$7,\!45 ext{E-}05$
210	$0,\!8$	20	-321,73	$1448,\!96$	1,05E-04
400	$0,\!15$	16	-278,77	1158,77	6,74E-05
400	$0,\!15$	18	-266,736	1142,9	6,44E-05
400	$0,\!15$	20	$-253,\!867$	$1093,\!16$	8,42E-05
400	0,4	16	-330,832	1424,87	8,12E-05
400	$0,\!4$	18	-307,401	$1250,\!61$	7,73E-05
400	0,4	20	-280,977	1254,72	6,95E-05
400	0,8	16	-336,028	1414,97	9,18E-05
400	0,8	18	-315,938	1455,61	7,37E-05
400	0,8	20	-304,682	1429,06	1,01E-04

Tabella A.6: dot 2

$\mathbf{T0}$	m	h	Tensione	Tensione effet-	wear traction
			media [MPa]	tiva [MPa]	MAX [mm]
20	$0,\!15$	16	39,3465	$1281,\!57$	5,02E-06
20	$0,\!15$	18	-15,9753	$1158,\!17$	9,22E-07
20	$0,\!15$	20	44,6152	$1233,\!58$	1,34E-06
20	0,4	16	-45,1186	1449,42	5,27E-06
20	0,4	18	-44,4365	1364,91	2,40E-06
20	0,4	20	$-39,\!6157$	1358,84	2,57E-06
20	0,8	16	$-126,\!665$	1692,42	1,82E-06
20	0,8	18	-29,4696	1479,85	3,05E-06
20	0,8	20	-64,2269	1549,39	9,03E-07
210	$0,\!15$	16	120,129	1189,41	3,05E-06
210	$0,\!15$	18	-24,1647	1141,98	1,01E-06
210	$0,\!15$	20	41,1317	$1228,\!54$	1,35E-06
210	0,4	16	-77,7088	$1504,\!63$	4,17E-06
210	0,4	18	-41,1701	$1322,\!23$	2,43E-06
210	$0,\!4$	20	-40,7186	1299,34	2,76E-06
210	$0,\!8$	16	100,323	1156,78	4,46E-06
210	$0,\!8$	18	$51,\!893$	1270,18	2,06E-06
210	$0,\!8$	20	-105,966	1602,57	2,21E-06
400	$0,\!15$	16	$13,\!8318$	$1039,\!64$	2,94E-06
400	$0,\!15$	18	-31,1641	$1125,\!93$	7,46E-07
400	$0,\!15$	20	-14,0562	$1084,\!56$	$1,\!68E-06$
400	0,4	16	-113,331	$1515,\!35$	$6,\!63E-06$
400	0,4	18	7,26131	$1144,\!22$	1,83E-06
400	$0,\!4$	20	-69,7956	1323,97	1,77E-06
400	0,8	16	84,679	1473,03	4,23E-06
400	0,8	18	-35,5874	1406,51	2,85E-06
400	0,8	20	-83,5678	1437,1	2,82E-06

Tabella A.7: dot 3

$\mathbf{T0}$	m	h	Tensione	Tensione effet-	wear traction
			media [MPa]	tiva [MPa]	MAX [mm]
20	$0,\!15$	16	-635,561	223,924	9,42E-05
20	$0,\!15$	18	-629,821	203,218	1,09E-04
20	$0,\!15$	20	-606,939	218,018	9,71E-05
20	$0,\!4$	16	-802,362	311,931	1,33E-04
20	$0,\!4$	18	-748,83	287,323	1,14E-04
20	$0,\!4$	20	-728,594	278,72	1,52E-04
20	0,8	16	-963,997	390,944	2,06E-04
20	0,8	18	-840,222	377,163	2,12E-04
20	0,8	20	-840,498	358,223	2,19E-04
210	$0,\!15$	16	-632,578	226,009	9,26E-05
210	$0,\!15$	18	-621,822	215,184	1,02E-04
210	$0,\!15$	20	-608,73	$205,\!389$	1,16E-04
210	$0,\!4$	16	-804,957	$305,\!938$	1,41E-04
210	$0,\!4$	18	-733,719	276,524	1,30E-04
210	$0,\!4$	20	-716,176	279,13	$1,\!68E-04$
210	$0,\!8$	16	-782,029	411,916	2,03E-04
210	0,8	18	-815,729	397,226	2,15E-04
210	0,8	20	-830,561	363,33	2,14E-04
400	$0,\!15$	16	-622,627	247,085	1,14E-04
400	$0,\!15$	18	-617,416	222,845	9,73E-05
400	$0,\!15$	20	-604,394	$204,\!653$	1,06E-04
400	0,4	16	-792,059	$314,\!693$	$1,\!31E-04$
400	0,4	18	-691,464	286,833	1,33E-04
400	$0,\!4$	20	-700,485	278,59	1,69E-04
400	0,8	16	-763,276	395,377	1,87E-04
400	0,8	18	-795,965	$374,\!455$	2,11E-04
400	0,8	20	-789,274	$375,\!399$	2,29E-04

Tabella A.8: dot 4

$\mathbf{T0}$	m	h	Tensione	Tensione effet-	wear traction
			media [MPa]	tiva [MPa]	MAX [mm]
20	$0,\!15$	16	-671,357	382,417	5,09E-05
20	$0,\!15$	18	-672,808	$359,\!185$	$5,\!61E-\!05$
20	$0,\!15$	20	-645,226	$373,\!273$	$5,\!67E-\!05$
20	$0,\!4$	16	-817,975	492,831	1,24E-04
20	$0,\!4$	18	-768,63	456,105	1,44E-04
20	$0,\!4$	20	-759,153	455,558	1,59E-04
20	0,8	16	-968,15	613,054	2,36E-04
20	0,8	18	-850,026	$575,\!205$	2,87E-04
20	0,8	20	-855,938	570,051	3,12E-04
210	$0,\!15$	16	-664,811	382,872	4,77E-05
210	$0,\!15$	18	-660,696	$365,\!235$	5,28E-05
210	$0,\!15$	20	-646,946	$359,\!643$	$5,\!64E-\!05$
210	$0,\!4$	16	-822,226	491,333	1,18E-04
210	0,4	18	$-757,\!647$	$443,\!647$	1,41E-04
210	0,4	20	-749,352	448,714	1,54E-04
210	0,8	16	-805,755	$607,\!924$	2,36E-04
210	$0,\!8$	18	-818,473	$583,\!194$	2,83E-04
210	$0,\!8$	20	-842,34	562,266	3,07E-04
400	$0,\!15$	16	-661,254	390,854	4,88E-05
400	$0,\!15$	18	-653,987	371,743	5,22E-05
400	$0,\!15$	20	-641,623	$352,\!129$	5,73E-05
400	$0,\!4$	16	-800,41	488,84	1,17E-04
400	$0,\!4$	18	$-717,\!651$	$457,\!439$	1,35E-04
400	$0,\!4$	20	-713,817	440,275	1,53E-04
400	0,8	16	-791,907	594,842	2,31E-04
400	0,8	18	-806,816	561,963	2,71E-04
400	0,8	20	-804,157	561,561	2,98E-04

Tabella A.9: dot 5

$\mathbf{T0}$	m	h	Tensione	Tensione effet-	wear traction
			media [MPa]	tiva [MPa]	MAX [mm]
20	$0,\!15$	16	-679,15	$630,\!966$	3,78E-05
20	$0,\!15$	18	-670,501	600,71	4,32E-05
20	$0,\!15$	20	-651,505	$607,\!43$	4,88E-05
20	$0,\!4$	16	-800,555	835,672	9,55E-05
20	$0,\!4$	18	-763,668	773,968	1,10E-04
20	$0,\!4$	20	$-757,\!054$	771,883	1,24E-04
20	0,8	16	-927,383	1051,99	1,71E-04
20	$0,\!8$	18	-856,565	982,983	1,90E-04
20	0,8	20	-854,401	969,351	2,11E-04
210	$0,\!15$	16	-666,001	636,068	3,76E-05
210	$0,\!15$	18	-656,986	609,413	4,29E-05
210	$0,\!15$	20	$-651,\!39$	606,236	$4,\!82E-\!05$
210	$0,\!4$	16	-779,203	840,198	1,13E-04
210	0,4	18	-751,292	$764,\!488$	1,09E-04
210	$0,\!4$	20	$-741,\!653$	$762,\!358$	1,23E-04
210	0,8	16	-792,512	$960,\!173$	$1,\!69E-04$
210	$0,\!8$	18	-827,858	$979,\!282$	$1,\!89E-04$
210	$0,\!8$	20	$-837,\!637$	962,079	2,05E-04
400	$0,\!15$	16	$-651,\!352$	640,149	$3,\!69E-05$
400	$0,\!15$	18	-648,856	$624,\!387$	4,24E-05
400	$0,\!15$	20	-641,093	$600,\!574$	4,77E-05
400	$0,\!4$	16	-777,486	834,265	9,58E-05
400	$0,\!4$	18	-710,552	$757,\!388$	1,07E-04
400	0,4	20	712,928	756,398	1,21E-04
400	0,8	16	-782,679	958,719	1,66E-04
400	0,8	18	-804,823	$953,\!675$	1,84E-04
400	0,8	20	-799,222	942,854	2,04E-04

Tabella A.10: dot 6

Appendice B

Caratteristiche del materiale [8]





 Wst.-Nr.:
 1.2365

 EN / DIN:
 32CrMoV12-28 / X32 CrMoV33

 Normativa:
 EN ISO 4957

AISI: **H10** AFNOR: **32DCV28**

ANALISI CHIMICA (valori di riferimento in %)

Elemento	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Мо	V
min.	0,28	0,10	0,15			2,70	2,50	0,40
max.	0,35	0,40	0,45	<= 0,030	<= 0,020	3,20	3,00	0,70

PROPRIETA'

Acciaio speciale con elevata resistenza alle oscillazioni termiche e formazione di incrinature a caldo, ottima tenacità e buona resistenza al rinvenimento, elevate proprietà meccaniche a caldo, idoneo al raffreddamento in acqua come mezzo raffreddante in esercizio di lavoro, possibilità di nitrurazione. Temprabile in aria ed in olio.

PROPRIETA' FISICHE

Conducibilità termica W/(m·k)								
20°C 500°C 600°C								
30 31,1 29,7								
Densità g/cm³								
20°C 500°C 600°C								
7,88	7,71	7,65						

Coefficiente di espansione termica lineare 10⁻⁶ • K⁻¹

20 - 100 °C	20 - 200°C	20 - 300°C	20 - 400°C	20 - 500°C	20 - 600°C	20 - 700°C
12,6	13,3	13,8	14,2	14,6	15,1	15,4

IMPIEGO

Utensili sottoposti ad elevate sollecitazioni termiche impiegati per l'estrusione di leghe pesanti e leghe leggere, come bussole intermedie, bussole interne, punzoni, matrici, dischi pressatori, mandrini pressatori - Utensili per camere e cavi - Utensili per pressofusione (grandi quantitativi) - Utensili per la lavorazione dell'acciaio, come stampi e matrici per la produzione di viti, bulloni e rivetti, inserti per stampi, matrici per teste di valvola, teste pressatrici - Utensili e mandrini per stiratura (lavorazione di particolari a corpo cavo secondo il metodo Erhardt) – Stampi per magli e presse – Lame per cesoie a caldo.

TRATTAMENTO TERMICO

Ricottura di lav	Raffredda	mento		Durezza						
780 – 810°C	in forno			r	max. 229 HB					
Distensione			Raffredda	mento						
ca. 650°C	in forno									
Temperatura di austenitizzazione			Mezzo di s	spegnimen	ito	[Durezza dopo tempra			
1010 – 1050°C			aria/olio/b	agno term	ico 450 - 55	50°C 4	44 - 54 HRC			
Rinvenimento	300°C	400°C	500°C	550°	С	600°C	650°C	700°C		
HRC	51	50	49 49 49 50					48	41	29
N/mm ²	1730	1680	1620	1620	1620	1680		1570	1300	940

CS METAL EUROPE s.r.l.

Via Caselle, 3P-3Q 25081 Bedizzole (BS) E-mail: info@csmetaleurope.com PEC: csmetaleurope@pec.it C.F./P.IVA IT 03984220982 REA BS-578174







CARATTERISTICHE MECCANICHE A TEMPERATURE ELEVATE

CS METAL EUROPE s.r.l.

1000

800

600

400

0-

0

A5 200

100

200

300

TEMPERATURA PROVA (°C)

400

Via Caselle, 3P-3Q 25081 Bedizzole (BS) E-mail: info@csmetaleurope.com PEC: csmetaleurope@pec.it

500

600

C.F./P.IVA IT 03984220982 REA BS-578174

5(

4(

3(

20

1(

0 700

Bibliografia

- [1] Walter Nicodemi. «Metallurgia: principi generali». In: (2000) (cit. a p. 5).
- [2] Z Gronostajski, Marcin Kaszuba, Marek Hawryluk e Maciej Zwierzchowski. «A review of the degradation mechanisms of the hot forging tools». In: Archives of Civil and Mechanical Engineering 14 (2014), pp. 528–539 (cit. a p. 5).
- [3] DH Kim, HC Lee, BM Kim e KH Kim. «Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes». In: *Journal of Materials Processing Technology* 166.3 (2005), pp. 372–380 (cit. alle pp. 6–8).
- [4] JeFoa Archard. «Contact and rubbing of flat surfaces». In: Journal of applied physics 24.8 (1953), pp. 981–988 (cit. a p. 8).
- [5] Nikolai Biba, QuantorForm Ltd Moscow e Dipl-Ing Hendrik Muntinga. «Increasing of tool life in cold forging by means of fem simulation». In: International Conference «New Developments in Forging Technology» in Fillbach. 2005 (cit. a p. 19).
- [6] V.I. Vladimirov. «Physical theory of metal failure». In: Moscow, Metallurgy. 1984 (cit. a p. 20).
- [7] Claudia Bandini Pietro Albonetti Prof. Lorenzo Donati. «Analisi del processo di estrusione di leghe leggere con il software Qform: validazione e previsione della microstruttura». In: *Tesi di Laurea.* 2014 (cit. a p. 23).
- [8] CS Metal Europe Srl. https://www.csmetaleurope.com/ (cit. alle pp. 116–119).