

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria Meccanica
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

Influenza dei parametri di processo nella seconda fase della lappatura di sfere
per cuscinetti mediante tecniche statistiche del DOE e dell' ANOVA



Relatori:

Prof.ssa Raffaella Sesana

Ing. Irene Pessolano Filos

Tutor aziendale Sebastiano Rizzo

Candidato:

Di Giovanni Giulio Pio

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Abstract

La lappatura delle sfere è un processo ad alta precisione e vede l'utilizzo di due dischi in bachelite all'interno dei quali sono realizzate gole destinate alla circolazione delle sfere. Uno dei due dischi è solidale alla struttura della macchina e viene denominato placca. Il secondo disco invece è messo in rotazione attraverso un motore asincrono e una serie di cinematismi ed è denominato mola. Attraverso il moto relativo di tali elementi è possibile rimuovere il sovrametallo delle sfere che circolano all'interno delle gole.

Durante questa lavorazione è estremamente importante controllare e limitare le numerose variabili in grado di causare la formazione di difetti superficiali nelle sfere e in generale dare una qualità del prodotto finito superiore o uguale alle tolleranze richieste dal cliente.

A tal fine è estremamente importante capire come tutti i fattori influenti nel processo siano correlati tra loro

Il presente elaborato si concentra sull'operazione di lappatura ovvero l'ultima fase del processo di produzione di sfere in acciaio per cuscinetti. Più in particolare, scopo di tale elaborato è quello di ottimizzare la seconda fase del processo di lappatura delle sfere e dunque il prodotto finito vero e proprio.

Lo studio è di tipo sperimentale e, mediante opportuna progettazione degli esperimenti con la tecnica del *Design of Experiment (DOE)* per studiare gli effetti dei parametri di processo sulla qualità delle sfere quantificata in particolare con i parametri di ondulosità, ovalità e rugosità delle stesse.

Come previsto dalla tecnica del *DOE*, viene realizzata una campagna sperimentale in cui i parametri di processo vengono fatti variare tra determinati livelli. I dati acquisiti dalle analisi condotte sulle sfere durante le prove vengono studiati con approccio statistico secondo il metodo dell'*ANOVA (Analysis of Variance)*.

Dal punto di vista aziendale, l'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di ottimizzare il ciclo di produzione individuando la combinazione di ottimo dei fattori in esame che consenta di migliorare sia la qualità finale del prodotto finito (geometria e rugosità delle sfere) sia i tempi e dunque i costi di produzione (tasso di asportazione del materiale).

Sommario

1. INTRODUZIONE.....	1
1.1 Processo di produzione delle sfere	2
1.1.1 Formatura a freddo	2
1.1.2 Limatura	3
1.1.3 Trattamento termico.....	3
1.1.4 Scouring.....	3
1.1.5 Molature soft.....	4
1.1.6 Asciugatura.....	4
1.1.7 Controllo qualità.....	4
1.2 OBIETTIVI DEL LAVORO DI TESI	5
1.3 PROCESSO DI LAPPATURA NELL'AZIENDA.....	7
1.3.1 Specifiche macchina	7
1.3.2 Controllo del processo.....	8
2. STATO DELL'ARTE	11
2.1 IL PROCESSO DI LAPPATURA.....	11
2.2 DESIGN OF EXPERIMENT	12
2.2.1 Studio del problema	12
2.2.2 Scelta dei fattori e dei livelli	12
2.2.3 Scelta della risposta.....	13
2.2.4 Scelta del piano sperimentale.....	13
2.2.5 Esecuzione degli esperimenti.....	14
2.2.6 Analisi statistica dei dati mediante l'ANOVA.....	14
2.2.7 Conclusioni	14
2.3 PARAMETRI DI PROCESSO	15
2.3.1 A Novel Lapping Method for High Precision Balls Based on Variable-Radius V Groove [10]	15
2.3.2 Effect of Various Parameters on Material Removal Rate in Flashing Operation of Precision Steel Ball manufacturing [12]	16
2.3.3 Effect of Various Parameters on Spread in Flashing Operation of Precision Steel Ball manufacturing process [13]	18
2.3.4 Experimental Study on Surface Roughness and Flatness in Lapping of AISI 52100 Steel [14]	19
2.3.5 Experimental study on lapping ceramic balls with variable-radius groove plate [15]	20

2.3.6 Examination of the material removal mechanisms during the lapping process of advanced ceramic rolling elements [16].....	21
2.3.7 Data-based Probe for Bearing Balls using Design Expert with Biodegradable Media [17]	23
3.1 PRIMA PARTE DELL' ANALISI	26
3.1.1 Analisi su "Minitab"	26
3.1.2 Analisi su Rstudio	29
3.1.3 Confronto tra Rstudio e Minitab	33
3.1.4 Risultati Vdwtwo e M1two	37
3.1.5 M1two	40
3.2 SECONDA PARTE DELL' ANALISI.....	43
3.2.1 Analisi su Minitab	43
3.2.2 analisi su Rstudio	45
3.2.3 Confronto tra "Minitab" e "Rstudio"	46
3.2.4 Risultati Vdwtwo e M1two	48
3.3 SECONDA PARTE ANALISI ALTERNATIVA	52
3.3.1 Confronto Rstudio e Minitab	52
3.4 COCLUSIONI RELATIVE AI PRIMI DUE STEP DELL'ANALISI	58
3.5 TERZA PARTE DELL'ANALISI.....	60
3.5.1 Grafico di Pareto	60
3.5.2 Grafico di probabilità normale dei residui	63
3.5.3 Grafico "Residuals versus Fit"	67
3.5.4 Risposta media di ogni fattore significativo sulla risposta in esame	70
3.5.5 SUPERFICI DI RISPOSTA.....	76
3.6 QUARTA PARTE DELL'ANALISI.....	84
3.6.1 Analisi su "Minitab"	85
3.6.2 Analisi su "Rstudio".....	87
3.6.3 Confronto risultati "Rstudio" e "Minitab"	93
3.7 CONCLUSIONI SUI DUE SOFTWARE	94
4. SETUP SPERIMENTALE	95
4.1 Comparatore	95
4.2 MWA.....	98
4.3 Stereomicroscopio.....	100
4.4 RUGOSIMETRO	101
4.5 Termometro a mercurio	102
4.6 MANOMETRO.....	103

4.7 FLUSSOSTATO.....	104
4.8 INVERTER.....	105
5. METODOLOGIA: DESIGN OF ESXPERIMENT SFERE DIAMETRO 17.462	106
5.1 INDIVIDUAZIONE DEI FATTORI.....	106
5.2 SCELTA DEL PIANO SPERIMENTALE	107
5.3 PROVE SPERIMENTALI	108
5.3.1 ACQUISIZIONE DEI DATI.....	109
6. TEST SU SFERE DIAMETRO 17.462.....	110
6.1 TEST 1	110
6.2 TEST 2	112
6.3 TEST 3	114
6.4 TEST 4	116
6.5 TEST 5	118
6.6 TEST 6	120
6.7 TEST 7	122
6.8 TEST 8	124
6.9 TEST 9	126
6.10 TEST 10	128
6.11 TEST 11	130
6.12 TEST 12	132
6.13 TEST 13	134
6.14 TEST 14	136
6.15 TEST 15	138
6.16 TEST 16.....	140
7. RISULTATI SFERE DIAMETRO 17.462	142
7.1 MODELLO CUTRATE.....	145
7.1.1 GRAFICO DI PARETO	147
7.1.2 GRAFICI SUI RESIDUI	148
7.1.3 Superfici di risposta	150
7.2 MODELLO VDw	151
7.2.1 GRAFICO DI PARETO	153
7.2.2 GRAFICI SUI RESIDUI	153
7.2.3 Superfici di risposta	154
7.3 MODELLO M1	156

7.3.1 Grafico di Pareto.....	157
7.3.2 Grafici sui residui	158
7.3.3 Superfici di risposta	159
7.4 MODELLO Ra	160
7.4.1 Grafico di Pareto.....	161
7.4.2 Grafici sui residui	162
7.4.3 Superfici di risposta	163
7.5 OTTIMIZZAZIONE DEI PARAMETRI	164
7.5.1 Primo processo di ottimizzazione	165
7.5.2 Secondo processo di ottimizzazione	168
9. TEST SU SFERE DIAMETRO 17.462 SECONDA FASE	169
6.1 TEST 13	169
10. SFERE DIAMETRO 17.462 UNICA FASE	174
11. Conclusioni	180
12. APPENDICE.....	182
12.1 ANALISI PRIMA FASE LAPPATURA SFERE 17,462 SOFTWARE MINITAB	182
12.1.1 modello CUT RATE	183
12.1.2 Modello Vdw	185
12.1.3 Modello M1.....	186
12.1.4 Modello Ra.....	187
12.2 ANALISI IN UNITA' CODIFICATE PRIMA FASE LAPPATURA 17,462.....	188
12.2.1 Analisi codificata sulla totalità dei fattori	188
12.2.2 Analisi codificata sui fattori più significativi.....	189
Bibliografia	192

Figura 1 Stabilimento di Pinerolo (To) TN Italy S.p.A.	1
Figura 2 Proto-sfera	2
Figura 3 Placca/mola.....	3
Figura 4 Sfera nelle varie fasi del processo di produzione	4
Figura 5 Road map.....	9
Figura 6 Meccanismo di funzionamento del processo di lappatura.....	11
Figura 7 Passaggi di pianificazione esperimenti e analisi risultati	12
Figura 8 L'orma di lappatura sulla superficie della sfera	16
Figura 9 Tasso di asportazione asportato in funzione di più combinazioni dei dischi	17
Figura 10 valori medi delle prove relative ai due livelli dei tre parametri studiati (MRR)	18
Figura 11 valori medi delle prove relative ai due livelli dei tre parametri studiati (SPREAD).....	18
Figura 12 Fattori e livelli lappatura anelli dei cuscinetti	19
Figura 13 Influenza sul processo di lappatura (Ra) dei fattori.....	19
Figura 14 Grafici ottenuti attraverso metodo S/N.....	20
Figura 15 Tabelle ANOVA studio sfere in ceramica per MRR (sinistra) e roundness (destra)	21
Figura 16 caratteristiche due tipologie di sfere	21
Figura 17 Influenza della velocità di rotazione della mola sul tasso di materiale asportato.....	22
Figura 18 Influenza della tipologia di lubro-refrigerante sul tasso di materiale asportato	22
Figura 19 Influenza del carico applicato sul tasso di materiale asportato	22
Figura 20 cut rated minitab "old"	24
Figura 21 Vdw Minitab "old"	25
Figura 22 M1 minitab "old"	25
Figura 23 impostazione di fattori e livelli su Minitab.....	26
Figura 24 piano sperimentale creato con minitab	27
Figura 25 tabella ANOVA cutratedmed new.....	28
Figura 26 funzione read.csv()	29
Figura 27 piano sperimentale creato con Rstudio.....	29
Figura 28 set di funzioni utilizzate per creare il piano sperimentale in Rstudio.....	30
Figura 29 piano sperimentale completo creato con Rstudio	30
Figura 30 tabella Anova ottenuta con le sottofunzioni FO,PQ e TWI.....	32
Figura 31 tabella ANOVA ottenuta con la sottofunzione I	32
Figura 32 confronto 1a tabella Rstudio e tabella Minitab.....	33
Figura 33 confronto 2a tabella Rstudio tabella Minitab	34
Figura 34 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab analisi in unità non codificate.....	35
Figura 35 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab analisi in unità codificate.....	36
Figura 36 confronto 1a tabella Rstudio e tabella Minitab Vdw	37
Figura 37 confronto 2a tabella Rstudio e Minitab Vdw.....	38
Figura 38 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab analisi in unità codificate.....	39
Figura 39 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab Vdw	39
Figura 40 confronto 1a tabella Rstudio e tabella Minitab M1	40
Figura 41 confronto 2a tabella Rstudio e tabella Minitab M1	41
Figura 42 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab M1	42

Figura 43 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab analisi in unità codificate	42
Figura 44 errore riportato da Minitab	43
Figura 45 tabella ANOVA old	44
Figura 46 tabella ANOVA new	44
Figura 47 funzione "rsm()" aggiornata	45
Figura 48 tabella "ANOVA" Rstudio	45
Figura 49 confronto Rstudio e Minitab	46
Figura 50 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab in unità codificate	47
Figura 51 output "Rstudio"	48
Figura 52 confronto output Rstudio e Minitab Vdw	48
Figura 53 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab in unità codificate	49
Figura 54 confronto output Rstudio e Minitab M1two	50
Figura 55 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab in unità codificate	51
Figura 56 confronto Rstudio e Minitab cutrated	52
Figura 57 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab Cutrated analisi in unità non codificate	53
Figura 58 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab in unità codificate	53
Figura 59 confronto output Rstudio e Minitab Vdw	54
Figura 60 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab Vdw analisi in unità non codificate	55
Figura 61 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab in unità codificate	55
Figura 62 confronto output Rstudio e Minitab M1	56
Figura 63 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab in unità codificate	57
Figura 64 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab M1, analisi in unità non codificate	57
Figura 65 Grafico di Pareto "Minitab" "NEW"	60
Figura 66 Grafico di Pareto "Minitab" "OLD"	61
Figura 67 funzioni necessarie a realizzare il grafico di pareto	61
Figura 68 grafico di pareto "Rstudio"	62
Figura 69 Grafico di pareto "Minitab" (sinistra) e "Rstudio" (destra)	62
Figura 70 Grafico di pareto "Minitab" (sinistra) e "Rstudio" (destra)	63
Figura 71 Grafico di probabilità normale dei residui "Minitab" "OLD"	64
Figura 72 Grafico di probabilità normale dei residui "Minitab" "NEW"	64
Figura 73 funzioni "qqnorm()" e "qqline()"	65
Figura 74 Grafico di probabilità normale dei residui "Rstudio"	65
Figura 75 Grafico di probabilità normale dei residui "Minitab" (sinistra) e "Rstudio" (destra)	66
Figura 76 Grafico di probabilità normale dei residui "Minitab" (sinistra) e "Rstudio" (destra)	66
Figura 77 Grafico "Residuals versus fit" "Minitab" "OLD"	67
Figura 78 Grafico "Residuals versus fit" "Minitab" "NEW"	67
Figura 79 Grafico " residui vs fitted" "Rstudio"	68
Figura 80 funzioni "fitted()" e "plot()"	68
Figura 81 Grafico " residui vs fitted" "Minitab" (sinistra) e "Rstudio" (destra)	69
Figura 82 Grafico " residui vs fitted" "Minitab" (sinistra) e "Rstudio" (destra)	69
Figura 83 grafici risposta media "Minitab" "NEW" (Sopra) e "OLD" (Sotto)	70
Figura 84 grafico interazione tra i fattori "Minitab" "NEW" (Sopra) e "OLD" (Sotto)	71
Figura 85 funzione "plotmeans()" per i fattori di pressione, velocità e portata	72

Figura 86 grafici risposta media "Rstudio"	72
Figura 87 funzione "interaction.plot()"	73
Figura 88 interaction plot "Rstudio" (Sinistra) e "Minitab" "NEW" (Destra)	73
Figura 89 Grafico risposta media "Minitab" "NEW" (Sopra) E "Old" (Sotto).....	74
Figura 90 Grafici risposta media "Rstudio"	74
Figura 91 grafico interazione tra i fattori "Minitab" "NEW" (Sinistra) e "OLD" (Destra)	75
Figura 92 grafico interazione tra i fattori "Rstudio"	75
Figura 93 superfici di risposta Minitab "NEW" (Sinistra) "OLD" (Destra)	76
Figura 94 contour plot "Minitab" "NEW" (Sinistra) e "OLD" (Destra)	77
Figura 95 funzioni "persp()" e "contour()"	78
Figura 96 superfici di risposta "Rstudio" (Sinistra) e "Minitab" "NEW" (Destra).....	78
Figura 97 Superfici di risposta "Rstudio" (Sinistra) e "Minitab" "NEW" (Destra)	80
Figura 98 Superfici di risposta "Rstudio" (Sinistra) e "Minitab" "NEW" (Destra)	82
Figura 99 "contour plot" "Rstudio" (Sinistra) e "Minitab" "NEW" (Destra).....	83
Figura 100 parametri di ottimo "Minitab" "OLD" (Sopra) e "NEW" (Sotto)	85
Figura 101 grafici di ottimizzazione delle risposte Minitab "New" (Destra) e "Old" (Sinistra)	86
Figura 102 vettori "x1","x2" e "x3"	87
Figura 103 funzione "cutrate()"	87
Figura 104 funzione "ga()"	88
Figura 105 file "summaryGA_cutrate"	88
Figura 106 file "summaryGA_Vdw" (Sinistra) e "summaryGA_M1" (Destra).....	89
Figura 107 file "MAX_SINGOLA_RISPOSTA_FATTORI"	89
Figura 108 costruzione file "MAX_SINGOLA_RISPOSTA_FATTORI".....	89
Figura 109 file "TARGET_RISPOSTA"	90
Figura 110 costruzione file "TARGET_RISPOSTA"	90
Figura 111 funzione "fun_max()"	90
Figura 112 funzione "ga()" con sottofunzione "fun_max()"	90
Figura 113 file "MAX_RISPOSTE_FATTORI"	91
Figura 114 file "MAX_RISPOSTE"	92
Figura 115 "DESIRABILITY_SINGOLE_RISPOSTE"	93
Figura 116 calcolo delle "desirability" delle singole risposte.....	93
Figura 117 Comparatore in linea	95
Figura 118 Schema messa in rotazione mandrino MWA	98
Figura 119 Diagramma polare	99
Figura 120 Re-hardening	100
Figura 121 Re-tempering	100
Figura 122 rugosimetro SURFTEST SV-3100.....	101
Figura 123 ugelli per la fuoriuscita di lubro-refrigerante (sinistra) vaschetta per la raccolta di lubro-refrigerante (destra).....	102
Figura 124 Manometro.....	103
Figura 125 Flussostato in linea	104
Figura 126 Principio di funzionamento del flussostato	104
Figura 127 Inverter.....	105
Figura 128 Schema realizzazione analisi di un test sperimentale	109
Figura 129 DEV.STD [%]	144
Figura 130 Grafico di Pareto CUT RATE	147
Figura 131 Grafico probabilità normale dei residui CUT RATE	148

Figura 132 Grafico Residui vs Fitted CUT RATE	149
Figura 133 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) CUT RATE pressione vs portata	150
Figura 134 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) CUT RATE pressione vs velocità	150
<i>Figura 135 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) CUT RATE velocità vs portata</i>	<i>151</i>
Figura 136 Grafico di Pareto VDw	153
Figura 137 Grafico probabilità normale dei residui VDw	153
Figura 138 Grafico Residui vs Fitted VDw	154
Figura 139 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) VDw pressione vs velocità.....	154
Figura 140 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) VDw pressione vs portata	154
Figura 141 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) VDw velocità vs portata.....	155
Figura 142 Grafico di Pareto M1	157
Figura 143 Grafico probabilità normale dei residui M1	158
Figura 144 Grafico residual vs fitted M1	158
Figura 145 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) M1 pressione vs velocità.....	159
Figura 146 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) M1 velocità vs portata.....	159
Figura 147 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) M1 pressione vs portata	159
Figura 148 Grafico di pareto Ra	161
Figura 149 Grafico probabilità normale dei residui Ra	162
Figura 150 Grafico residui vs fitted Ra.....	162
Figura 151 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) Ra pressione vs velocità.....	163
Figura 152 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) Ra velocità vs portata.....	163
Figura 153 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) Ra pressione vs portata	163
Figura 154 confronto risposte lavoro precedente e lavoro corrente primo processo di ottimizzazione	166
Figura 155 confronto desirability lavoro precedente e lavoro corrente primo processo di ottimizzazione	167
<i>Figura 156 Tolleranze vs risultati roundness</i>	<i>172</i>
<i>Figura 157 Tolleranze vs risultati waveness</i>	<i>172</i>
Figura 158 Andamento risposte waveness durante TEST A	178
<i>Figura 159 Grafico Modello vs risultati.....</i>	<i>179</i>
Figura 2 Coefficienti modello Rstudio (sopra) e Minitab (sotto) VDw... Errore. Il segnalibro non è definito.	
Figura 3 Coefficienti modello Rstudio (sopra) e Minitab (sotto) M1	186
Figura 4 Coefficienti modello Rstudio (sopra) e Minitab (sotto) Ra.....	187

Tabella 1	Caratteristiche materiale di placca e mola	8
Tabella 2	Fattori e livelli studio sfere in ceramica	20
Tabella 3	Risposte Minitab "OLD" e Minitab "NEW"	86
Tabella 4	Fattori e risposte Minitab "NEW" e Rstudio	93
Tabella 5	“Desirability” e “composite desirability” Minitab "NEW" e Rstudio	93
Tabella 6	Output comparatote TEST 1 ORA 00:00.....	97
Tabella 7	Bande di frequenza.....	99
Tabella 8	valori di riferimento parametri di processo.....	106
Tabella 9	Livelli fattori	107
Tabella 10	Elenco prove sperimentali.....	108
Tabella 11	Parametri TEST 1.....	110
Tabella 12	Tracciabilità TEST 1	110
Tabella 13	Diametro - attacco acido - temperatura TEST 1	111
Tabella 14	Dati MWA TEST 1	111
Tabella 15	Dati Rugosimetro TEST 1.....	111
Tabella 16	Risposte percentuali TEST 1.....	112
Tabella 17	Parametri TEST 2.....	112
Tabella 18	Tracciabilità TEST 2.....	112
Tabella 19	Diametro - attacco acido - temperatura TEST 2	112
Tabella 20	Dati MWA TEST 2	113
Tabella 21	Dati Rugosimetro TEST 2.....	113
Tabella 22	Risposte percentuali TEST 2.....	113
Tabella 23	Parametri TEST 3.....	114
Tabella 24	Tracciabilità TEST 3	114
Tabella 25	Diametro - attacco acido - temperatura TEST 3	114
Tabella 26	Dati MWA TEST 3	115
Tabella 27	Dati Rugosimetro TEST 3.....	115
Tabella 28	Risposte percentuali TEST 3.....	115
Tabella 29	Parametri TEST 4.....	116
Tabella 30	Tracciabilità TEST 4.....	116
Tabella 31	Diametro - attacco acido - temperatura TEST 4	116
Tabella 32	Dati MWA TEST 4	117
Tabella 33	Dati Rugosimetro TEST 4.....	117
Tabella 34	Risposte percentuali TEST 4.....	117
Tabella 35	Parametri TEST 5.....	118
Tabella 36	Tracciabilità TEST 5.....	118
Tabella 37	Diametro - attacco acido - temperatura TEST 5	118
Tabella 38	Dati MWA TEST 2.....	119
Tabella 39	Dati Rugosimetro TEST5.....	119
Tabella 40	Risposte percentuali TEST 5.....	119
Tabella 41	Parametri TEST 6.....	120
Tabella 42	Tracciabilità TEST 6.....	120
Tabella 43	Diametro - attacco acido - temperatura TEST 6	120
Tabella 44	Dati MWA TEST 6.....	121
Tabella 45	Dati Rugosimetro TEST 6.....	121

Tabella 46 Risposte percentuali TEST 6.....	121
Tabella 47 Parametri TEST 7.....	122
Tabella 48 Tracciabilità TEST 7.....	122
Tabella 49 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 7.....	122
Tabella 50 Dati MWA TEST 7.....	123
Tabella 51 Dati Rugosimetro TEST 7.....	123
Tabella 52 Risposte percentuali TEST 7.....	123
Tabella 53 Parametri TEST 8.....	124
Tabella 54 Tracciabilità TEST 8.....	124
Tabella 55 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 8.....	124
Tabella 56 Dati MWA TEST 8.....	125
Tabella 57 Dati Rugosimetro TEST 8.....	125
Tabella 58 Risposte percentuali TEST 8.....	125
Tabella 59 Parametri TEST 9.....	126
Tabella 60 Tracciabilità TEST 9.....	126
Tabella 61 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 9.....	126
Tabella 62 Dati MWA TEST 9.....	127
Tabella 63 Dati Rugosimetro TEST 9.....	127
Tabella 64 Risposte percentuali TEST 9.....	127
Tabella 65 Parametri TEST 10.....	128
Tabella 66 Tracciabilità TEST 10.....	128
Tabella 67 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 10.....	128
Tabella 68 Dati MWA TEST 10.....	129
Tabella 69 Dati Rugosimetro TEST 10.....	129
Tabella 70 Risposte percentuali TEST 10.....	129
Tabella 71 Parametri TEST 11.....	130
Tabella 72 Tracciabilità TEST 11.....	130
Tabella 73 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 11.....	130
Tabella 74 Dati MWA TEST 11.....	131
Tabella 75 Dati Rugosimetro TEST 11.....	131
Tabella 76 Risposte percentuali TEST 11.....	131
Tabella 77 Parametri TEST 12.....	132
Tabella 78 Tracciabilità TEST 12.....	132
Tabella 79 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 12.....	132
Tabella 80 Dati MWA TEST 12.....	133
Tabella 81 Dati Rugosimetro TEST 12.....	133
Tabella 82 Risposte percentuali TEST 12.....	133
Tabella 83 Parametri TEST 13.....	134
Tabella 84 Tracciabilità TEST 13.....	134
Tabella 85 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 13.....	134
Tabella 86 Dati MWA TEST 13.....	135
Tabella 87 Dati Rugosimetro TEST 13.....	135
Tabella 88 Risposte percentuali TEST 13.....	135
Tabella 89 Parametri TEST 14.....	136
Tabella 90 Tracciabilità TEST 14.....	136
Tabella 91 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 14.....	136
Tabella 92 Dati MWA TEST 14.....	137

Tabella 93 Dati Rugosimetro TEST 14.....	137
Tabella 94 Risposte percentuali TEST 14.....	137
Tabella 95 Parametri TEST 15.....	138
Tabella 96 Tracciabilità TEST 15.....	138
Tabella 97 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 15	138
Tabella 98 Dati MWA TEST 15.....	139
Tabella 99 Dati Rugosimetro TEST 15.....	139
Tabella 100 Risposte percentuali TEST 15.....	139
Tabella 101 Parametri TEST 16.....	140
Tabella 102 Tracciabilità TEST 16.....	140
Tabella 103 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 16	140
Tabella 104 Dati MWA TEST 16.....	141
Tabella 105 Dati Rugosimetro TEST 16.....	141
Tabella 106 Risposte percentuali TEST 16.....	141
Tabella 107 Risultati variazione rispetto al singolo lotto	142
<i>Tabella 108 Caratteristiche lotti all'ora 00:00.....</i>	143
<i>Tabella 109 Caratteristiche medie lotti all'ora 00:00</i>	143
Tabella 110 Risultati utilizzati durante l'analisi	144
Tabella 111 Tabella ANOVA CUTRATE.....	145
Tabella 112 Tabella ANOVA CUT RATE fattori più significativi.....	146
Tabella 113 Tabella coefficienti CUT RATE analisi non codificata.....	146
Tabella 114 Tabella ANOVA VDw.....	151
Tabella 115 Tabella ANOVA VDw fattori più significativi.....	152
Tabella 116 Tabella coefficienti VDw analisi non codificata.....	152
Tabella 117 Tabella ANOVA M1.....	156
Tabella 118 Tabella ANOVA M1 fattori più significativi.....	156
Tabella 119 Tabella coefficienti M1 analisi non codificata.....	157
Tabella 120 Tabella ANOVA Ra.....	160
Tabella 121 Tabella ANOVA Ra fattori più significativi.....	160
Tabella 122 Tabella coefficienti Ra analisi non codificata.....	161
Tabella 123 Fattori che ottimizzano le singole risposte primo processo di ottimizzazione	165
Tabella 124 Risposte target primo processo di ottimizzazione.....	165
Tabella 125 Fattori e risposte ottimizzati primo processo di ottimizzazione	165
Tabella 126 Desirabilità e composite desirability primo processo di ottimizzazione.....	165
Tabella 127 Fattori e risposte ottimizzati lavoro precedente	166
Tabella 128 Desirability e composite desirability lavoro precedente	167
Tabella 129 Fattori e risposta ottimizzati relativi alla sola rugosità.....	168
Tabella 130 Fattori e risposte ottimizzati secondo processo di ottimizzazione.....	168
Tabella 131 Desirability e composite desirability secondo processo di ottimizzazione.....	168
Tabella 132 Parametri TEST 13.....	169
Tabella 133 Tracciabilità TEST 13	169
Tabella 134 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 13	169
Tabella 135 Dati MWA TEST 13	170
Tabella 136 Dati rugosimetro TEST 13.....	171
Tabella 137 Variazioni percentuali TEST 13	171
Tabella 138 Parametri Test A	174
Tabella 139 Tracciabilità Test A.....	174

Tabella 140 Diametro - attacco acido - temperatura TEST A	175
Tabella 141 Dati MWA TEST A	176
Tabella 142 Dati rugosimetro TEST A	177
Tabella 143 Variazioni percentuali TEST A.....	177
Tabella 144 Piano sperimentale prima fase lappatura sfere 17,462.....	182
Tabella 145 ANOVA considerando la totalità dei fattori Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) CUT RATE	183
Tabella 146 ANOVA considerando fattori più significativi Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) CUT RATE	183
Tabella 147 Coefficienti modello Rstudio (sopra) e Minitab (sotto) CUT RATE	184
Tabella 148 ANOVA considerando la totalità dei fattori Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) VDw	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 149 ANOVA considerando fattori più significativi Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) VDw	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 150 ANOVA considerando la totalità dei fattori Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) M1	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 151 ANOVA considerando fattori più significativi Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) M1	Errore. Il segnalibro non è definito.
Tabella 152 ANOVA considerando la totalità dei fattori Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) Ra	187
Tabella 153 ANOVA considerando fattori più significativi Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) M1	187
Tabella 154 Tabella dei coefficienti analisi codificata CUT RATE	188
Tabella 155 Tabella dei coefficienti analisi codificata VDw.....	188
Tabella 156 Tabella dei coefficienti analisi codificata M1	189
Tabella 157 Tabella dei coefficienti analisi codificata Ra	189
Tabella 158 Tabella dei coefficienti analisi codificata CUT RATE	189
Tabella 159 Tabella dei coefficienti analisi codificata VDw.....	190
Tabella 160 Tabella dei coefficienti analisi codificata M1	190
Tabella 161 Tabella dei coefficienti analisi codificata Ra	190

1. INTRODUZIONE

Il lavoro di tesi è stato svolto in collaborazione con l'azienda *TN Italy S.p.A.* presso lo stabilimento di Pinerolo (To). Tale azienda si occupa della realizzazione di sfere in acciaio ad alta precisione, prevalentemente destinate al mercato dei cuscinetti. La produzione si divide in base al diametro della sfera, i quali vanno da 3,969 mm a 33,338 mm passando per circa 30 altri valori.



Figura 1 Stabilimento di Pinerolo (To) TN Italy S.p.A.

L'intera produzione è basata su una logica “*Pull*” e sfrutta i concetti di *KanBan* e della filosofia *Lean Manufacturing* tipici dell'*Industria 4.0*.

1.1 Processo di produzione delle sfere

Prima di procedere con l'illustrazione del lavoro di tesi è opportuno effettuare una breve presentazione sul processo di produzione delle sfere. Questo può avvenire per formatura a freddo oppure per formatura a caldo a seconda del diametro della sfera che si vuole produrre. Solitamente per sfere con diametro superiore a 35 mm si sfrutta un processo di formatura a caldo. I canali produttivi presenti nella sede di Pinerolo di TN Italia seguono un processo di formatura a freddo, a partire da una vergella in acciaio 100Cr6 ovvero uno dei materiali più utilizzati nella realizzazione non solo delle sfere, ma anche per altri elementi dei cuscinetti quali rulli, anelli e gabbie.

1.1.1 Formatura a freddo

La vergella viene fatta passare all'interno di una macchina, la quale esegue un processo di trafilatura. Il filo entra in una pressa all'interno della quale viene tagliato per mezzo di un utensile, detto coltello, dotato di taglienti in carburo di tungsteno formando così un cilindro. Una pinza posiziona tale elemento tra due stampi semisferici. Questi vengono pressati l'uno contro l'altro in un processo che prende il nome di stampaggio. Al termine di tale processo non si ottiene una sfera vera e propria bensì un elemento che prende il nome di "proto-sfera". Questa ha un evidente quantità di sovra-metallo sia lungo l'equatore sia in corrispondenza dei poli. Tale sovra-metallo è dovuto al fatto che i due stampi semisferici non vanno a toccarsi. Sia i poli che l'equatore vengono poi eliminati dal processo successivo ovvero quello di limatura

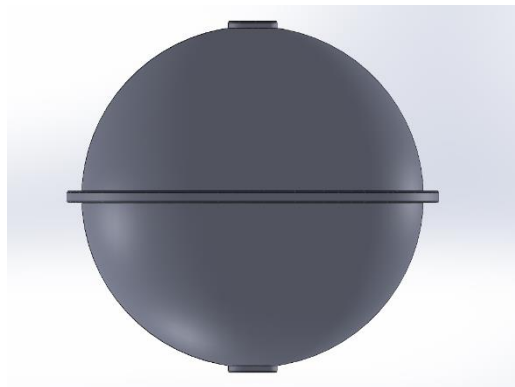


Figura 2 Proto-sfera

1.1.2 Limatura

Il processo di limatura elimina il sovra-metallo che forma l'equatore e i poli della sfera. Tale processo è quello che asporta la maggiore quantità di materiale. Il processo di asportazione avviene attraverso il moto relativo della sfera con due dischi scanalati. Uno dei due, detto mola, è posto in rotazione mentre l'altro, detto placca, è solidale alla macchina. Le sfere si muovono all'interno delle scanalature realizzate all'interno dei dischi, le quali sono dette gole. Affinché si abbia la rimozione del materiale non è sufficiente il solo moto relativo, ma viene esercitata una pressione mediante l'ausilio di un sistema di spinta idraulico.

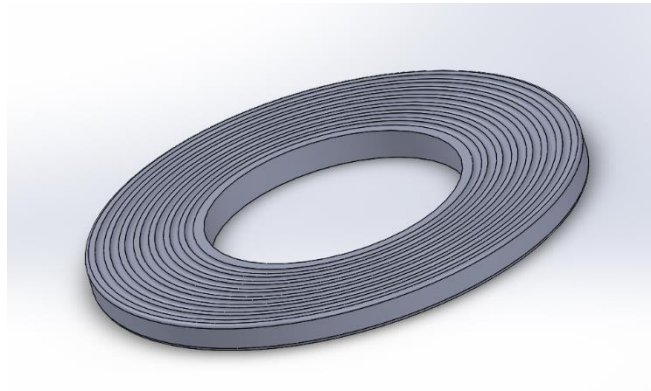


Figura 3 Placca/mola

1.1.3 Trattamento termico

Il trattamento termico viene effettuato con lo scopo di aumentare la durezza superficiale delle sfere. Le sfere entrano all'interno di grandi forni elettrici, dove vengono portate ad una temperatura di circa 900 °C. Questa temperatura è sufficientemente elevata da far austenitizzare l'acciaio. Si ha dunque la tempra in olio, la quale porta le sfere alla temperatura di circa 60 °C. Si ha poi il processo di rinvenimento alla temperatura di circa 160 °C.

Il processo di tempra e rinvenimento non è il solo trattamento che viene effettuato per aumentare la durezza superficiale delle sfere. Viene effettuato anche un processo detto *scouring*.

1.1.4 Scouring

Tale processo aumenta la durezza superficiale delle sfere attraverso il fenomeno dell'incrudimento. La macchina che si utilizza per questa operazione è costituita da un cilindro rotante con cavità al suo interno. All'interno di queste ultime le sfere vengono portate a una determinata altezza e successivamente vengono lasciate cadere per effetto della gravità. In questo modo le sfere in caduta urtano contro la superficie del cilindro. Gli urti sono responsabili dell'incrudimento delle sfere.

1.1.5 Molature soft

Una volta raggiunta la durezza superficiale voluta le sfere subiscono altre lavorazioni, le quali seguono tutte lo stesso principio di funzionamento della limatura. Ciò che varia tra queste lavorazioni è la quantità di sovra-metallo asportata. Si rimuove sempre meno materiale con l'obiettivo di aumentare la qualità delle sfere dal punto di vista geometrico e della rugosità evitando l'insorgere di difetti. Le operazioni di molatura sono:

- Rettifica
- Prefinitura
- Prima fase di lappatura
- Seconda fase di lappatura

1.1.6 Asciugatura

Le sfere devono essere controllate per verificare che soddisfino la qualità richiesta. Prima di arrivare a tale fase vengono asciugate all'interno di una tramoggia vibrante. Questa è riempita con un prodotto derivante dalla farina di mais ovvero il "Marizorb". Tale fase permette di eliminare oltre ad eventuali scarti di lavorazione, anche l'umidità presente con lo scopo di evitare eventuali ossidazioni.

1.1.7 Controllo qualità

Il controllo della qualità avviene in automatico mediante una macchina che effettua un controllo ottico-induttivo.

Il controllo ottico viene effettuato attraverso un fascio laser, il quale colpisce la sfera e viene riflesso. In questo modo è possibile valutare la superficie ed eventuali difetti difficilmente individuabili altrimenti;

Il controllo induttivo viene effettuato grazie ad una sonda in grado di generare un campo magnetico attraverso la sfera. Tale controllo ha lo scopo di individuare eventuali mancanze di materiale.

Le sfere che hanno superato entrambi i controlli raggiungono dunque l'ultima fase della produzione ovvero quella del confezionamento. Le sfere scartate subiscono invece una nuova fase di controllo ottico-induttivo



Figura 4 Sfera nelle varie fasi del processo di produzione

1.2 OBIETTIVI DEL LAVORO DI TESI

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di ottimizzare il processo di lappatura delle sfere in acciaio. Scopo di questo processo di ottimizzazione è sia quello della riduzione dei tempi di lavorazione e quindi dei costi, sia quello di aumentare la qualità del prodotto finito. Inoltre, tale lavoro, si pone come ulteriore passaggio in un possibile processo di automazione, oltre che a fungere da riferimento per l'addetto macchina.

Il presente lavoro di tesi pone le sue basi in un precedente lavoro ovvero "Influenza dei parametri di processo nell'operazione di lappatura delle sfere per cuscinetti: Design of Experiment (DOE) e analisi statistica" redatto da G. D'Attila per il Politecnico di Torino nel 2021"[1] Tale lavoro aveva lo scopo di ottimizzare la prima fase del processo di lappatura delle sfere in acciaio dal diametro di 15,875 mm. Il processo di ottimizzazione si avvaleva di campagne sperimentali pianificate mediante la tecnica del *Design of Experiment* e dell'analisi statistica dell'*ANOVA*. Tali strumenti erano volti all'individuazione della combinazione di ottimo di alcuni parametri di processo in modo da velocizzare la prima fase del processo di lappatura.

Il presente lavoro si basa sui risultati ottenuti nel precedente lavoro spostando l'attenzione su sfere dal diametro di 17,462 mm e soprattutto vuole ottimizzare la seconda fase del processo di lappatura. Per dare continuità al lavoro precedente utilizzeranno le tecniche del *DOE* e dell'*ANOVA*. Grazie al *DOE* si pianificheranno le prove per la campagna sperimentale. In [1] si è dimostrato che un piano sperimentale del tipo *full factorial* non risulta sufficiente in quanto si necessita di un modello del secondo ordine, si partirà direttamente con un piano sperimentale del tipo *central composite design*². Questa tipologia di piano sperimentale prevede la realizzazione di un modello che comprenda termini quadratici.

La tecnica dell'*ANOVA* verrà realizzata impostando lo stesso rischio α di errore che è stato impostato in [1] in modo da rendere confrontabili i risultati dei due lavori. Definiti i fattori rilevanti mediante il *p-value* verrà individuato il modello di risposta. Verranno prodotti dei grafici, i quali permetteranno di verificare la bontà dei modelli individuati. Si procederà con l'ottimizzazione in simultanea di tutte le risposte, ovvero si individueranno i livelli dei fattori in esame che permettono di ottenere il massimo valore di *Composite Desirability*.³ Al termine del lavoro di tesi si effettueranno dei test con i parametri ottimizzati i quali permetteranno di dare una conferma sperimentale all'intero lavoro di tesi.

¹ Piano sperimentale tipico del DOE, il quale permette di realizzare un modello risposta del primo ordine

² Piano sperimentale in grado di fornire un modello di risposta del secondo ordine

³ Funzione di desiderabilità della risposta. Dopo un processo di ottimizzazione simultaneo di più risposte restituisce un valore compreso tra "0" e "1" dove il primo valore rappresenta una risposta da scartare mentre il secondo valore la risposta ideale

L'*ANOVA*, la definizione dei modelli e la successiva ottimizzazione dei parametri è stata condotta sul software *Rstudio* ovvero un software differente da quello del lavoro precedente, il quale ha sfruttato il software *Minitab*. La scelta è ricaduta su tale software in quanto più incline alle analisi statistiche rispetto a *Minitab*. In questo modo, questo elaborato vuole fungere da primo di una serie di step, i quali portino ad analisi statistiche sempre più complesse, non realizzabili sul primo software utilizzato. La prima parte della tesi ha visto dunque la replica dell'analisi effettuata nel lavoro precedente su *Rstudio*. Questa fase ha avuto il quadruplo scopo di:

- Capire il funzionamento del nuovo software
- Evidenziare eventuali differenze tra i due software
- Ottenere dei risultati indipendenti dal metodo di lavoro dei software
- Effettuare una verifica sui risultati sia ottenuti da *Minitab* sia da *Rstudio*

Si è dunque proceduto con l'effettuazione della campagna sperimentale e dell'analisi dei risultati sia sul software *Minitab* sia sul software *Rstudio*. Queste hanno portato alla definizione delle equazioni di regressione e dunque all'ottimizzazione dei parametri di processo.

La variazione dei parametri di processo rispetto agli standard correntemente utilizzati dall'azienda comporta il rischio di influire negativamente sul prodotto finito. Si è pertanto deciso di ripetere il processo di ottimizzazione sulla prima fase del processo. Tale decisione ha dunque sia lo scopo di far acquisire esperienza allo scrivente in una situazione in cui eventuali errori siano ancora recuperabili nella seconda fase del processo di lappatura, sia lo scopo di evidenziare possibili differenze rispetto al precedente processo di ottimizzazione. Tali differenze possono essere dovute sia all'utilizzo di una macchina *MLB 800* differente, sia al diverso diametro studiato suggerendo dunque un approccio differente da adottare in base al diametro della sfera da studiare.

1.3 PROCESSO DI LAPPATURA NELL'AZIENDA

Come detto nel paragrafo 1.1, incentrato sull'intero processo di realizzazione delle sfere, il processo di lappatura segue la stessa dinamica delle altre lavorazioni destinate all'asportazione di sovrametallo, ovvero le cosiddette molature soft e molature hard. Si hanno dunque due dischi, il primo detto placca fisso e solidale alla struttura della macchina lappatrice, il secondo messo in rotazione da un motore elettrico e una serie di cinematismi, il quale prende il nome di mola. Su entrambi i dischi si hanno scanalature, le quali prendono il nome di gole e hanno il compito di guidare le sfere durante l'operazione di lappatura.

I dischi sono realizzati in bachelite ovvero una resina fenolica termo-indurente estremamente resistente e leggera con una notevole resistenza al calore e agli agenti chimici

Durante il percorso delle sfere all'interno delle gole fattori come pressione specifica e velocità periferica relative alla singola sfera variano a seconda della distanza dall'asse di rotazione delle sfere. Queste variabili non sono facilmente controllabili durante il processo, specie se prese singolarmente. Per tale motivo il controllo delle sfere al termine della lavorazione non può avvenire se non su base statistica prelevando un opportuno numero di campioni dal lotto che si vuole esaminare.

La macchina lappatrice utilizzata nello studio corrente è una macchina MLB 800 [2]. Tale macchina può essere suddivisa in tre gruppi principali:

- Gruppo di trasmissione motore-madrino-portamola
- Mandrino e sistema di ancoraggio della mola
- Cilindro oleodinamico e gruppo di spinta

Altro elemento estremamente importante in tale macchina è il basamento in ghisa dal peso approssimativo di circa 5 tonnellate, il quale permette di avere stabilità strutturale e limitare il fenomeno delle vibrazioni.

La macchina lappatrice è inoltre fornita di alcuni strumenti ausiliari, i quali permettono di migliorarne le performance aumentando la produttività e la duttilità:

- *Inverter* per la regolazione della velocità di rotazione della mola
- Controllo *PLC* per il controllo della pressione
- Sensori addetti al controllo delle vibrazioni.

1.3.1 Specifiche macchina

I dischi montati sulla macchina utilizzata per la realizzazione delle prove previsti dalla campagna sperimentale sono caratterizzati da un diametro esterno di 800mm e un diametro interno di 420 mm, con uno spessore di 30 mm.

A seconda della lavorazione a cui sono destinati, la placca e la mola sono realizzati in materiali specifici. Per quanto riguarda l'operazione di lappatura delle sfere da 17,462 mm le caratteristiche del materiale sono riassunte nella tabella di seguito.

Tabella 1 Caratteristiche materiale di placca e mola

ABRASIVO (abrasive)	WA	Extra friabile
GRANULOMETRIA (grain size)	6000	Ultra fine
GRADO (grade)	Z	Estremamente duro
STRUTTURA (structure)	9	Media
LEGANTE (bond)	B	Resinoide
CODICE FABBRICANTE (MFRS record)	(ZL	Legante speciale per la lappatura sfere
FORMA	(1)	Mola rotante
	(74)	Mola fissa

Come verrà spiegato nel Capitolo 2, un parametro importante nel processo di lappatura è la geometria delle gole. Affinché venga mantenuta una geometria il più possibile costante queste vengono sfacciate all'incirca ogni 20 lotti. Il processo di sfacciatura consiste in una tornitura di precisione delle gole. Mediante tale processo si riportano queste ultime alla geometria iniziale. In questo modo è possibile evitare che l'asportazione di materiale provocata dal meccanismo di usura vada a modificare eccessivamente geometria e profondità delle gole, influenzando la qualità finale delle sfere.

Elemento indispensabile durante il processo di lappatura è l'apporto di lubro-refrigerante. Questo ha il duplice compito di eliminare i trucioli di materiale proveniente sia dalle sfere che dai dischi formatosi a causa del processo di usura e di dissipare il calore formatosi a causa dello stesso fenomeno.

1.3.2 Controllo del processo

Ad oggi il meccanismo di controllo del processo è affidato all'esperienza dell'addetto macchina. Egli, infatti, oltre alle operazioni di carico e scarico macchina, è tenuto a seguire il ciclo prelevando circa ogni ora alcune sfere dal caricatore della macchina. Queste sono dunque misurate al comparatore secondo una procedura che verrà illustrata nel capitolo 4.

Unico ausilio all'operatore è la *road map*, ovvero un grafico in cui sull'asse delle ordinate è riportata la quantità di sovrametallo da asportare espressa in μm , mentre sull'asse delle ascisse è riportato il tempo di lavorazione espresso in ore. In tale grafico è rappresentata una serie di curve accompagnate da bande di tolleranza. Ognuna di queste curve rappresenta una lavorazione ideale alla quale le sfere possono essere soggette. L'addetto macchina controlla ogni ora che la lavorazione stia sempre all'interno delle bande di tolleranza regolando la pressione o la portata di lubro-refrigerante.

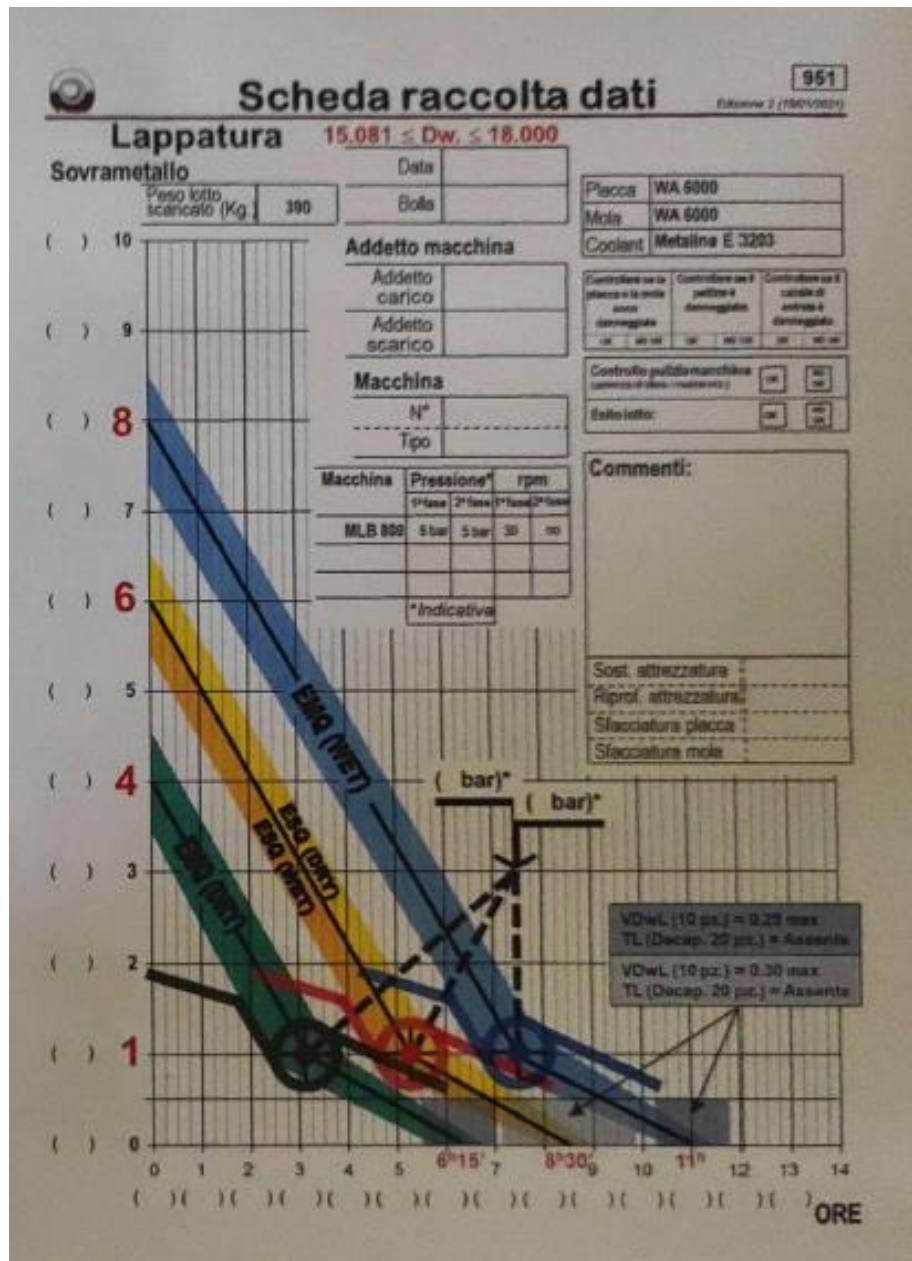


Figura 5 Road map

Nella *road map* riportata nella pagina precedente sono facilmente distinguibili le due fasi in cui è suddiviso il processo di lappatura. La prima fase, della durata di circa 5 ore, è detta fase di consumo. Questa prevede di asportare da 6 a 7 μm di sovrametallo. Al termine di tale fase si hanno tolleranze geometriche e dimensionali ancora lontane rispetto a quelle adottate per il prodotto finito.

La seconda fase del processo è detta fase di finitura e prevede l'asportazione di 1 μm di sovrametallo. Prevede una durata di circa 3 ore. La velocità di rotazione della mola e la portata di lubro-refrigerante sono le stesse della fase precedente, ma la pressione del gruppo di spinta viene ridotta. Per quanto riguarda le sfere da 17,462 la linea guida seguita dall'azienda prevede una pressione di 7 bar per la prima fase del processo e una pressione di 4 bar per la seconda.

2. STATO DELL'ARTE

2.1 IL PROCESSO DI LAPPATURA

E'una lavorazione di alta precisione, la quale può essere effettuata sia su superfici metalliche sia su superfici vetrose o ceramiche. Tale lavorazione viene utilizzata per portare la superficie da lavorare a specchio riducendone al minimo la rugosità. Tale processo viene utilizzato in svariati ambiti i quali possono spaziare da quelli inerenti all'elettronica fino alla realizzazione di gioielli, passando per la realizzazione di articoli casalinghi [3]. Nella metalmeccanica tale processo rappresenta generalmente l'ultima fase del processo di realizzazione e si vede necessaria qualora un componente debba assumere determinate caratteristiche di rifinitura, come per esempio i cilindri e i pistoni dei motori delle automobili. In tali casi i componenti finiti devono essere caratterizzati da superfici che necessitano di essere perfettamente levigate per poter garantire un'ottima funzionalità di esercizio. [4]

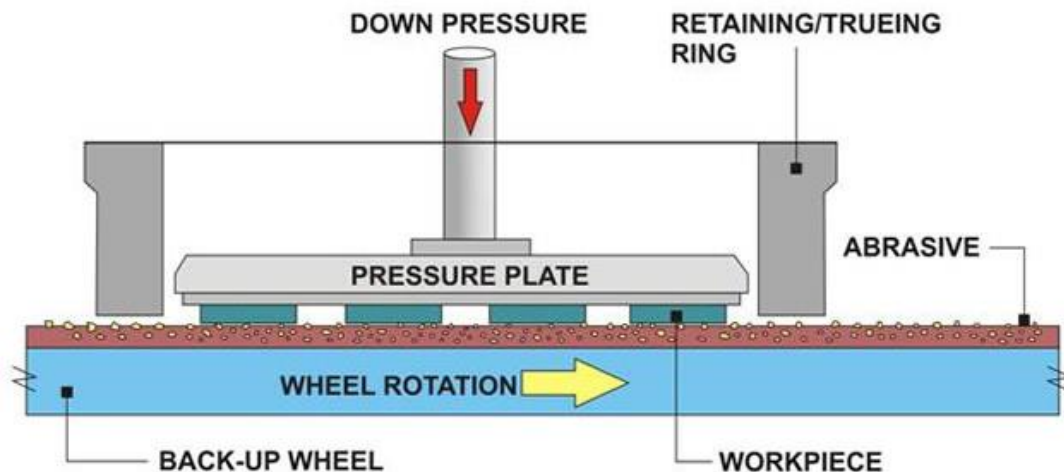


Figura 6 Meccanismo di funzionamento del processo di lappatura

In linea generale un processo di lappatura viene effettuato trattando la superficie da levigare con un composto (*lapping compound*) formato da una base, di consistenza acquosa oppure oleosa (che assolve anche una funzione refrigerante), e una componente abrasiva. Quest'ultima può essere costituita da materiali quali polvere di diamante, carburo di boro o di silicio, ossido di alluminio (tutti adoperati in ambito industriale) [5]

2.2 DESIGN OF EXPERIMENT

I dati raccolti attraverso le campagne sperimentali definite con il *DOE* possono essere studiati attraverso le tecniche statistiche che meglio si adattano all'individuazione del risultato cercato.

È possibile definire un esperimento, quando si decide di seguire un piano di prove sperimentali, modificando i valori delle variabili in ingresso per registrare le variazioni della risposta del sistema. Sfruttando la pianificazione sperimentale è dunque possibile:

- Migliorare l'efficienza del processo
- Ridurre i tempi e costi di sviluppo
- Ridurre i costi di produzione

Come per la definizione della campagna sperimentale, si è voluto dare continuità al lavoro di tesi precedente anche con l'analisi dei risultati. Per tale motivo si è deciso di sfruttare l'analisi della varianza, in breve "*ANOVA*".

Nei prossimi paragrafi verranno presentati i passaggi necessari alla realizzazione di un *DOE* terminando infine con una breve spiegazione sulla tecnica statistica dell'*ANOVA* [6] [7] [8].



Figura 7 Passaggi di pianificazione esperimenti e analisi risultati

2.2.1 Studio del problema

Prima di procedere con la programmazione della campagna sperimentale è opportuno ottenere una buona conoscenza del processo e di ciò che si vuole ottimizzare. Solo in questo modo è possibile individuare le criticità e individuare i parametri su cui impostare l'analisi.

2.2.2 Scelta dei fattori e dei livelli

Nello studio una qualsiasi problematica associata ad un processo produttivo il numero di fattori in gioco è estremamente elevato.

Sulla base di studi teorici e dell'esperienza pratica bisogna individuare i parametri di processo in grado di influenzare la risposta del sistema e dunque impostare la campagna sperimentale sulla

variazione di tali parametri. Bisogna inoltre considerare anche i fattori di disturbo, i quali possono andare ad influire sulla risposta del sistema, falsando in questo modo l'intera analisi. Bisogna dunque eliminare, o al massimo limitare l'effetto di tali fattori, i quali possono dividersi in due tipologie:

- Controllabili
- Incontrollabili

Definiti i parametri di disturbo e la metodologia con cui limitarli bisogna individuare i livelli dei fattori in esame. Con il termine livelli si intende i valori che i parametri di processo dovranno assumere nei test che vanno a realizzare la campagna sperimentale.

2.2.3 Scelta della risposta

La scelta della risposta da esaminare si riassume nell'individuazione di un parametro esplicativo delle caratteristiche del processo che si vogliono studiare. Oltre a ciò, la risposta deve essere scelta in funzione della strumentazione a disposizione e deve poter essere misurata con la massima affidabilità possibile

2.2.4 Scelta del piano sperimentale

Per piano sperimentale si intendono esperimenti completi o replicazioni degli stessi in cui sono provate tutte le combinazioni possibili di fattori e livelli. Si dice infatti che i fattori inseriti all'interno di un piano fattoriale sono incrociati.

L'effetto di un fattore può essere visto come la variazione nella risposta prodotta dalla variazione di livello di un fattore. In questo caso si parla di effetto principale. In alcuni esperimenti si può notare come la differenza nella risposta tra i livelli di un fattore non è la stessa per tutti i livelli degli altri fattori. Se ciò avviene si parla di interazione tra i fattori.

A seconda della situazione si possono avere diverse tipologie di piani sperimentali:

- *One-way Analysis*: vengono impostati i fattori non rilevanti a valori fissi i quali non vadano a disturbare la risposta in esame. Si fa invece variare sull'intervallo di analisi il fattore di cui si vuole studiare l'effetto. Inconveniente di tale piano sperimentale è la possibilità di cambiare il livello di un solo fattore per volta.
- *Full factorial*: Tale piano sperimentale viene anche identificato come piano 2^k . Indicando infatti con k il numero di fattori il numero di test da realizzare per completare la campagna sperimentale corrisponde proprio a 2^k . Con tale piano è possibile però condurre degli esperimenti che prevedano 2 livelli per ogni fattore.

Il modello statistico per un piano 2^k potrebbe comprendere k effetti principali, $\binom{k}{2}$ interazioni a 2 fattori (doppie), $\binom{k}{3}$ interazioni triple, ..., e un'interazione a k fattori.

Un potenziale problema nell'utilizzo del piano fattoriale 2^k è l'ipotesi di non linearità negli effetti dei fattori. In alcuni sistemi è infatti necessario includere effetti del secondo ordine al fine di ottenere un modello adeguato. Ciò che si otterrà è dunque un modello di superficie di risposta del secondo ordine. In questo caso non è possibile utilizzare un piano sperimentale 2^k in quanto per adattare un modello quadratico è necessario che tutti i fattori compaiono nelle prove con minimo 3 livelli.

- *Central composite design*: Tale piano sperimentale, abbreviato con la sigla *CCD*, consiste in un piano fattoriale 2^k con n_F prove, $2k$ prove assiali e n_c prove centrali. L'utilizzo di un *CCD* viene di solito utilizzato quando un modello realizzato con un piano *full factorial* mostra una mancanza di adattamento. Vengono dunque aggiunte le prove assiali per consentire l'inclusione nel modello dei termini quadratici.

Nella realizzazione di un *CCD* occorre definire due parametri del piano ovvero la distanza α delle prove assiali dal centro del piano e il numero di punti centrali n_c .

Affinché il modello fornisca delle buone previsioni in tutta la regione di interesse, ovvero che si abbia una varianza della risposta prevista stabile, condizione sufficiente che il piano di una superficie di risposta del secondo ordine sia ruotabile. La varianza della risposta prevista dunque deve essere costante su sfere concentriche. Un piano *CCD* è reso ruotabile dalla scelta di α . Indicando dunque con n_F il numero di punti nella porzione di piano per ottenere un *CCD* ruotabile si può avere $\alpha=(n_F)^{1/4}$

Per una regione d'interesse sferica la migliore scelta è avere $\alpha=\sqrt{k}$, In questo caso si consiglia di effettuare da tre a cinque prove centrali.

Vi possono essere molte situazioni in cui la regione di interesse è cuboidale anziché sferica. In questo caso una variante utile del *CCD* è quella a facce centrate in cui $\alpha=1$. In questo caso viene però a mancare la ruotabilità del piano. Tale tipologia di piano sperimentale richiede meno punti centrali del *CCD* sferico. Solitamente è infatti sufficiente $n_c=2$.

2.2.5 Esecuzione degli esperimenti

Questi saranno eseguiti attraverso le modalità che meglio si adattano al processo che si vuole studiare evitando, per quanto possibile, tutte le possibili cause di variazione delle risposte non dovute ai fattori precedentemente stabiliti

2.2.6 Analisi statistica dei dati mediante l'ANOVA

Per l'analisi dei dati ricavati durante i test sperimentali vengono utilizzati delle tecniche statistiche, le quali permettono di trattare i dati ricavati con un criterio oggettivo al fine di poter ottenere delle conclusioni che non siano affette da preconcetti o *bias* cognitivi che indirizzerebbero l'analisi in una direzione errata.

La tecnica statistica più utilizzata è quella dell'*ANOVA*. Tale tecnica permette di gestire l'insieme delle informazioni contenute in un campione strutturato in termini sia di tendenze centrali, sia di dispersioni. Si imputa ad ognuna delle sorgenti di variazione una somma di quadrati ed un numero di gradi di libertà (GDL). Il residuo fornisce invece una stima dell'errore di fondo, il quale è detto variabilità intrinseca del sistema. Viene dunque identificata l'ipotesi nulla H_0 ovvero l'ipotesi che la media di k popolazioni del campione siano uguali. In contrasto viene formulata anche l'ipotesi complementare all'ipotesi nulla ovvero l'ipotesi alternativa H_A che prevede che le medie siano diverse. Mediante l'*ANOVA* le somme dei quadrati e i relativi GDL vengono ripartiti e imputati a diverse componenti. Dividendo le somme dei quadrati per i rispettivi GDL si ottengono varianze confrontabili tra loro. Nel caso l'ipotesi nulla venga smentita viene data per dimostrata la presenza di effetti sistematici.

2.2.7 Conclusioni

Una volta condotta la campagna sperimentale, aver acquisito i dati e averli analizzati con la tecnica statistica che meglio si adatta alla situazione, è possibile commentare i risultati ottenuti sfruttando anche l'ausilio di grafici che rendano più semplice trarre delle conclusioni in merito all'esperimento condotto. È inoltre necessario andare ad effettuare dei test di convalida, i quali vadano a confermare o meno le conclusioni raggiunte.

Un esempio di studio del *Central composite design* è rintracciabile all'interno del lavoro eseguito da *R.L.J. Coetzer, L.M. Haines e L.P. Fatti* del 2009. [9] In tale lavoro l'obiettivo è stato quello di indagare modelli del secondo ordine, i quali sono ampiamenti utilizzati nella metodologia delle superfici di risposta. In particolare, si è voluto studiare la natura e la posizione dell'optimum nella fase finale di un'analisi canonica completa. Lo scopo principale del lavoro del 2009 è quello di indagare la costruzione di design che abbiano punti di appoggio coincidenti con quelli di un *central composite design* e che allo stesso tempo massimizzino la precisione e l'accuratezza delle stime. L'attenzione è rivolta soprattutto al modello multivariabile del secondo ordine, ai design per procedure non sequenziali e ai criteri di ottimalità per il modello quadratico in una singola variabile esplicativa. Il lavoro eseguito da *Coetzer, Haines e Fatti* [9] inizia con l'introduzione del modello di superficie di risposta del secondo ordine andando dunque a discutere i design esatti e continui associati. Vengono poi sviluppati i criteri di ottimo appropriati per la stima precisa e accurata della posizione dell'*external point* e viene esplorata la loro applicazione nel contesto del *central composite design*.

2.3 PARAMETRI DI PROCESSO

L'operazione di lappatura è influenzata da un elevato numero di variabili, alcune delle quali riconducibili ai parametri di processo, altre alla tipologia di macchina lappatrice utilizzata, altre ancora di natura puramente aleatoria.

Nel proseguo della trattazione si vuole effettuare una breve presentazione dell'effetto di alcuni parametri di processo e di alcune caratteristiche della macchina esplorati in diversi studi nel corso degli anni.

2.3.1 *A Novel Lapping Method for High Precision Balls Based on Variable-Radius V Groove* [10]

Parametro estremamente importante nel processo di lappatura è la geometria delle gole all'interno delle quali si muovono le sfere. Nella lappatura tradizionale vengono utilizzate delle scanalature a V e un angolo di rotazione delle sfere all'interno delle gole pressoché costante. Questo metodo di lappatura rende impossibile generare una superficie sferica come orma di contatto tra le sfere e le pareti delle gole. Nel 2013, uno studio condotto da *Ping Zao* e altri si è incentrato sulla risoluzione di tale problematica. Tale studio ha dunque proposto un nuovo metodo di lappatura, basato su gole a V a raggio variabile.

È dunque stata realizzata una campagna sperimentale, la quale prevedeva di lavorare le sfere per un tempo di circa 2 minuti sfruttando 10 rotazioni della mola.

Analizzando i risultati sperimentali ottenuti si è osservato come, con un angolo di rotazione variabile, l'orma di lappatura assumeva una forma sferica ed era dunque in grado di ricoprire la quasi totalità della superficie della sfera, come si può osservare nella seguente figura.

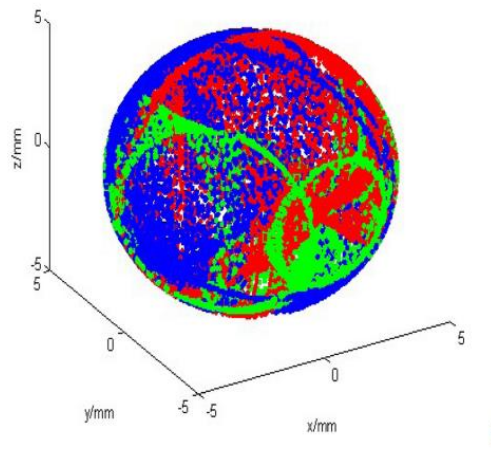


Figura 8 L'orma di lappatura sulla superficie della sfera

La qualità delle sfere lavorate con questo metodo di lappatura è stata valutata secondo la normativa *ISO 3290:1998, Rolling Bearings-Balls-Dimensions and Tolerances* [11]. Secondo tale normativa le sfere, prima di essere lavorate, soddisfacevano il grado di qualità G16. La maggior parte delle sfere finite rientravano all'interno del grado di qualità G5 mentre una piccola parte rientrava all'interno del grado di qualità G3.

2.3.2 Effect of Various Parameters on Material Removal Rate in Flashing Operation of Precision Steel Ball manufacturing [12]

Oltre alla geometria, altro parametro estremamente importante nel processo di lappatura è la profondità delle gole. Tale parametro è stato indagato nello studio del 2013 condotto da *Pratik J. Patel e Saurin Sheth*. In questo lavoro si è dunque analizzato come la profondità delle gole vada ad influenzare il tasso di materiale asportato.

In questo studio la profondità delle gole è stata espressa come frazione del diametro della sfera, indicato con D . Nel caso in cui si raggiunga una profondità pari a $0,5D$ si avrebbe contatto tra i due dischi abrasivi rendendo impossibile la lavorazione. Si è dunque scelto di imporre come profondità massima delle gole il 30% del diametro delle sfere. Si è dunque deciso di realizzare la campagna sperimentale su tre differenti profondità delle gole, rispettivamente pari a:

- $0,1D$
- $0,2D$
- $0,3D$

La campagna sperimentale è dunque stata realizzata combinando tali profondità, alternandole sulla piastra e sulla mola.

Nel grafico seguente si riporta sull'asse delle ascisse la profondità delle gole realizzate nella piastra, sull'asse delle ordinate la profondità delle gole realizzate nella mola e sull'asse verticale il tasso di materiale asportato, indicato come *MRR*.

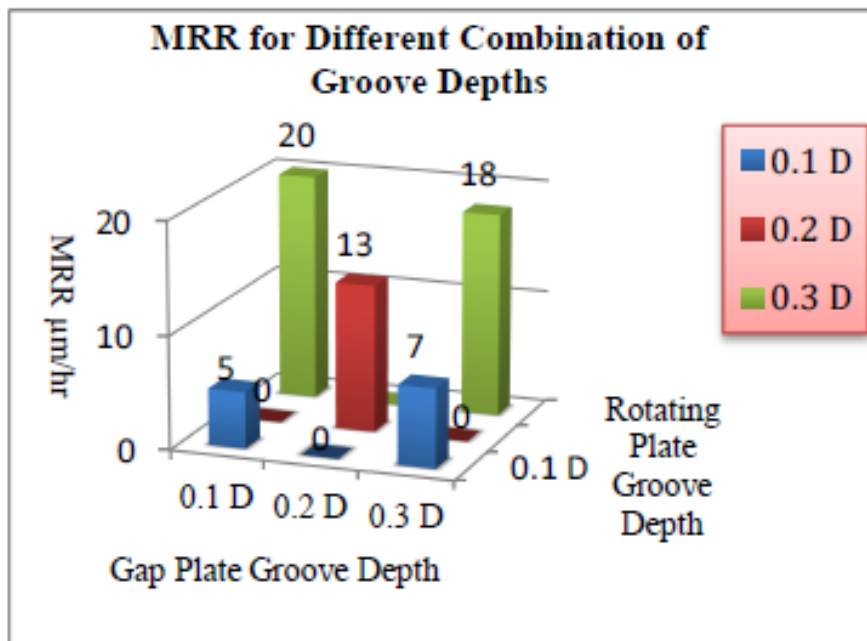


Figura 9 Tasso di asportazione asportato in funzione di più combinazioni dei dischi

Osservando il grafico si nota che i valori maggiori di *MRR* si ottengono considerando gole sulla piastra con una profondità pari a $0,1D$ e delle gole sulla mola con una profondità pari a $0,3D$. Si può inoltre osservare come la profondità delle gole sulla mola influenzi maggiormente il *MRR*.

In questo stesso studio *Pratik J. Patel* e *Saurin Sheth* hanno indagato l'influenza di altri parametri di processo sul *MRR*. I parametri indagati sono:

- La pressione del gruppo di spinta
- La velocità di rotazione della mola abrasiva
- Il numero delle gole all'interno dei dischi

Questa ulteriore analisi è stata condotta mediante la tecnica del *DOE* e la tecnica statistica dell'*ANOVA*. La campagna sperimentale è stata progettata sfruttando come piano sperimentale un *full factorial*. Si sono dunque realizzati 2^k test, dove k rappresenta il numero di fattori in esame. Avendo 3 fattori si sono dunque realizzate 8 prove. Tale ulteriore indagine ha portato alla conclusione che tutti e tre i parametri studiati risultano significativi ovvero hanno un'influenza sulla risposta in esame ovvero il *MRR*. Ciò non risulta invece veritiero per l'effetto di interazione tra i parametri, i quali risultano dunque non significativi.

Si riporta nei grafici seguenti i valori medi delle prove relative ai due livelli dei tre parametri studiati.

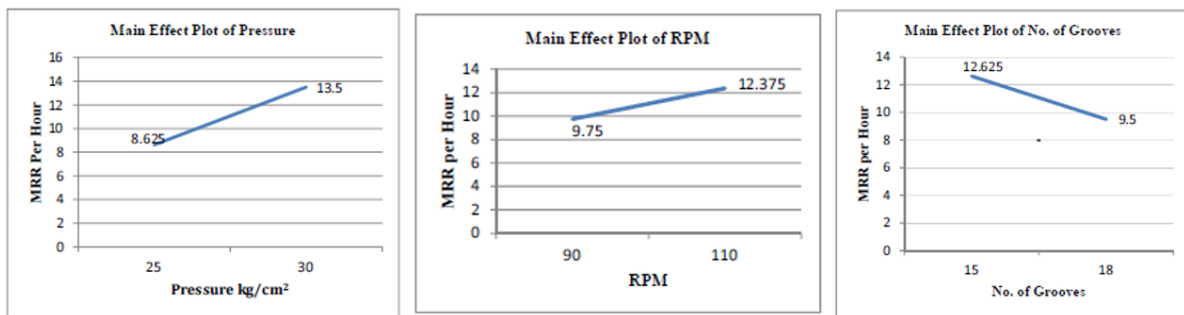


Figura 10 valori medi delle prove relative ai due livelli dei tre parametri studiati (MRR)

2.3.3 Effect of Various Parameters on Spread in Flashing Operation of Precision Steel Ball manufacturing process [13]

Nel 2014 Pratik J. Patel e Saurin Sheth hanno condotto un nuovo studio replicando la stessa tipologia di test realizzata nello studio dell'anno precedente. In questo nuovo lavoro si è considerata come risposta non più il tasso di materiale asportato bensì lo *Spread*. Si ricorda che per *Spread* si intende la variazione del diametro all'interno di uno stesso lotto di sfere.

Nuovamente si è considerato un piano sperimentale del tipo *full factorial* e si sono effettuate 8 prove. Nuovamente i risultati ottenuti dai test sono stati analizzati attraverso la tecnica statistica dell'*ANOVA*. Si riportano di seguito i valori medi delle prove relative ai due livelli dei tre parametri studiati.

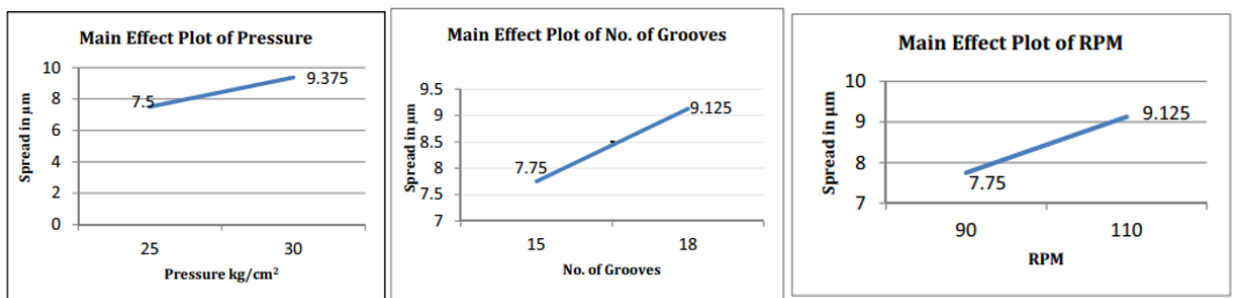


Figura 11 valori medi delle prove relative ai due livelli dei tre parametri studiati (SPREAD)

Da questa nuova analisi Pratik J. Patel e Saurin Sheth sono giunti nuovamente alla conclusione che tutti e tre i parametri studiati risultano significativi ovvero hanno un'influenza sulla risposta in esame. Ciò non risulta invece veritiero per l'effetto di interazione tra i parametri, i quali risultano dunque non significativi. Tali risultati ricalcano i risultati di [12] dove la risposta in esame era il *MRR* e non lo *spread*.

2.3.4 Experimental Study on Surface Roughness and Flatness in Lapping of AISI 52100 Steel [14]

Il processo di lappatura non viene effettuato solo sulle sfere, bensì anche sugli anelli dei cuscinetti. Una bassa qualità di tali elementi può infatti portare alle stesse problematiche dovute alla bassa qualità degli elementi volventi. La lappatura su tali elementi è stata studiata nel 2016 da *M. Farahnakian* e *H. Shahrajabian*.

In questo lavoro si è studiato l'effetto della pressione, della velocità di rotazione della mola, del numero di grana abrasiva e del tempo di lavorazione nella lappatura di anelli per cuscinetti in acciaio *AISI 52100*. La risposta presa in esame in questo studio è stata la rugosità superficiale degli anelli, in particolare l'indice di rugosità *Ra*.

La campagna sperimentale realizzata ha previsto la definizione di 3 livelli per questi 4 parametri di processo, i quali sono riassunti nella seguente tabella.

Symbol	Parameters	Level1	Level2	Level3
P	Pressure (kPa)	7	11.5	15.5
V	Lapping speed (m/s)	0.164	0.33	0.495
MS	Mesh number	200	400	600
T	Time (min)	5	10	15

Figura 12 Fattori e livelli lappatura anelli dei cuscinetti

I risultati ottenuti attraverso la campagna sperimentale sono poi stati analizzati attraverso la tecnica statistica dell'*ANOVA*. Nei seguenti grafici è possibile osservare l'influenza sul processo di lappatura di ognuno dei fattori in esame presi singolarmente.

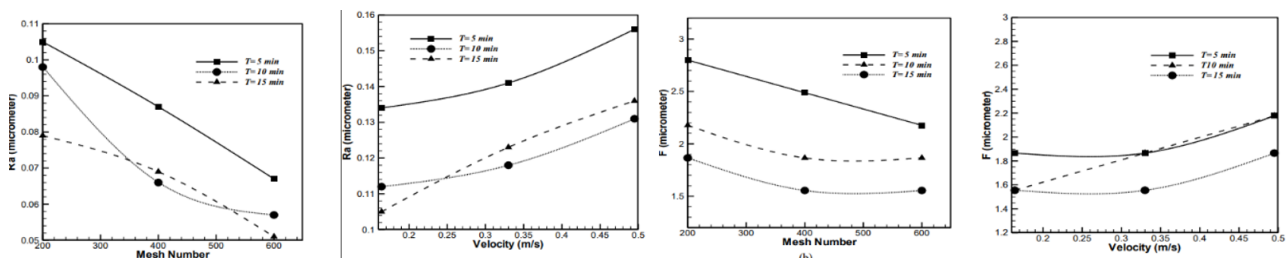


Figura 13 Influenza sul processo di lappatura (*Ra*) dei fattori

2.3.5 Experimental study on lapping ceramic balls with variable-radius groove plate [15]

Oltre alle sfere in acciaio, il processo di lappatura viene effettuato anche sulle sfere in ceramica. Queste, realizzate in Si_3N_4 , rappresentano il corpo volvente ideale per cuscinetti ad alta velocità e ad alta precisione in quanto sono caratterizzate da una bassa densità, elevata durezza e rigidità, buona resistenza all'usura.

Può dunque essere utile indagare anche il processo di lappatura relativo a tali sfere e in particolare come i vari parametri di processo ne influenzano la qualità finale. Si riporta dunque il lavoro condotto da Fenfen Zhou, Weifeng Yao e altri nel 2021 in cui si vanno ad indagare proprio tali aspetti. Nel loro lavoro è stato ideato un piano sperimentale attraverso il metodo Taguchi e sono state analizzate come risposte il tasso di rimozione di materiale e l'ovalità.

I parametri di processo considerati nella realizzazione del piano sperimentale, ed i rispettivi range di variazione sono riportati di seguito:

Tabella 2 Fattori e livelli studio sfere in ceramica

FATTORI	LIVELLI
Pressione di carico [N/sfera]	0,5-1-2,5-5
Concentrazione di abrasivo [%]	5-10-20
Velocità di rotazione della mola [RPM]	5-15-25
Dimensione media delle particelle di abrasivo [μm] (0,5-1-2)	0,5-1-2
Tempo di lavorazione [h]	2-15 (6,6,3)

I risultati ottenuti attraverso i test previsti dal piano sperimentale sono stati analizzati attraverso la tecnica del rapporto segnale/ rumore (S/N) e dell'ANOVA in modo da individuare i fattori più significativi per le risposte in esame.

La prima tecnica ha portato alla realizzazione dei seguenti grafici:

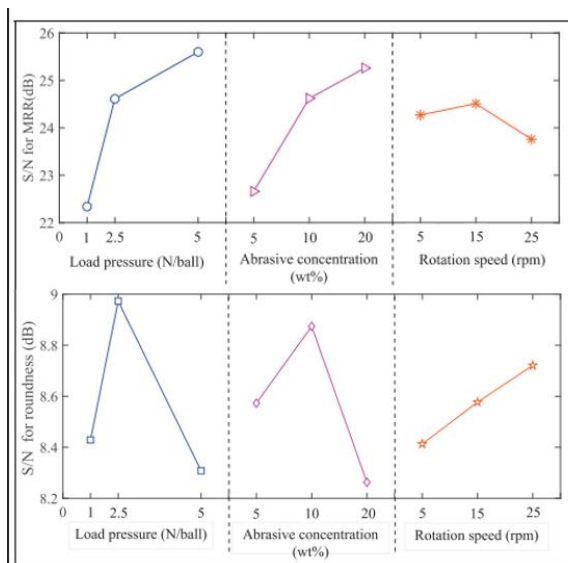


Figura 14 Grafici ottenuti attraverso metodo S/N

Da tale metodo la combinazione di ottimo che porta a massimizzare entrambe le risposte prevede una pressione di carico di 2.5 N/sfera, una concentrazione di abrasivo di 10 wt%, e una velocità di rotazione di 15 rpm.

La tecnica dell'ANOVA ha invece portato alla realizzazione delle seguenti tabelle.

Factors	DOF	SS	SS%	Factors	DOF	SS	SS%
Load pressure	2	16.8	57	Load pressure	2	0.75	50
Abrasive concentration	2	11.1	38	Abrasive concentration	2	0.56	38
Rotation speed	2	0.87	3	Rotation speed	2	0.14	9
Unknown	2	0.45	2	Unknown	2	0.04	3
Total	8	29.22	100	Total	8	1.49	100

Figura 15 Tabelle ANOVA studio sfere in ceramica per MRR (sinistra) e roundness (destra)

Da tali tabelle si notano facilmente i fattori più significativi per le due risposte. In ordine, tali fattori sono:

- MRR = pressione > concentrazione di abrasivo > velocità
- Ovalità = pressione > concentrazione di abrasivo > velocità di rotazione

la combinazione di ottimo prevista da tale analisi risulta essere la stessa rispetto a quella prevista dalla tecnica del S/N ovvero una pressione di carico di 2.5 N/Ball, una concentrazione di abrasivo di 10 wt%, e una velocità di rotazione di 15 rpm.

2.3.6 Examination of the material removal mechanisms during the lapping process of advanced ceramic rolling elements [16]

Altro lavoro su sfere in ceramica è quello effettuato da *J. Kanga* e *M. Hadfield* nel 2004. In questo lavoro si è andato a studiare l'effetto che il carico a cui sono sottoposte le sfere durante il processo di lappatura, la velocità di rotazione della mola e la tipologia di lubro-refrigerante hanno sul tasso di rimozione del materiale. Tali analisi sono state condotte su due tipologie di sfere in ceramica sfruttando una macchina lappatrice eccentrica. Le caratteristiche delle due tipologie di sfere sono riportate nella seguente tabella.

	TP1 ball blank (from manufacturer A)	TP2 ball blank (from manufacturer B)
Manufacturing process	Directly HIPed, then rough-ground	Sinter + HIPed
Density (kg/m ³)	3160	3237
Ball diameter (mm)	13.255	13.46–13.50
Ball roundness variation (mm)	0.001	0.030–0.075
Surface roughness, R_a (μm)	0.202	2.645
Surface hardness (Vickers Hardness Number, VH10)	1682	1532
Fracture toughness (MPa m ^{1/2})	5.3	6.6

Figura 16 caratteristiche due tipologie di sfere

L'influenza dei vari fattori analizzati, sul tasso di rimozione di materiale sulle due tipologie di sfere sono riassunti nei seguenti grafici:

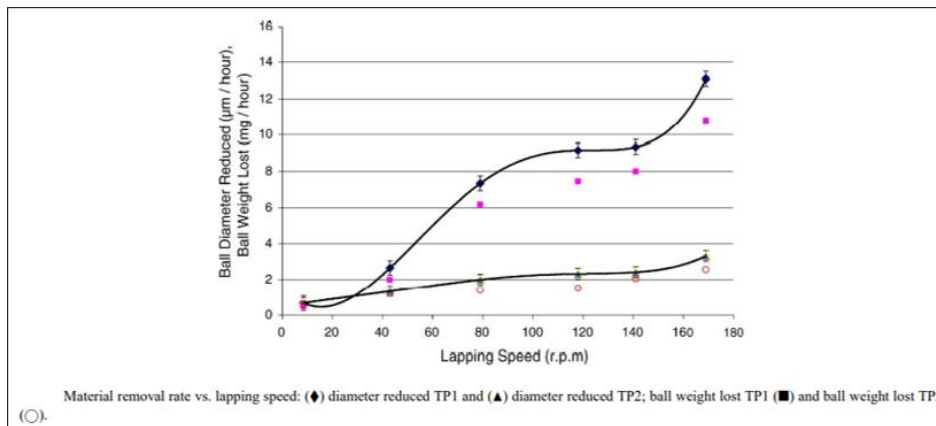


Figura 17 Influenza della velocità di rotazione della mola sul tasso di materiale asportato

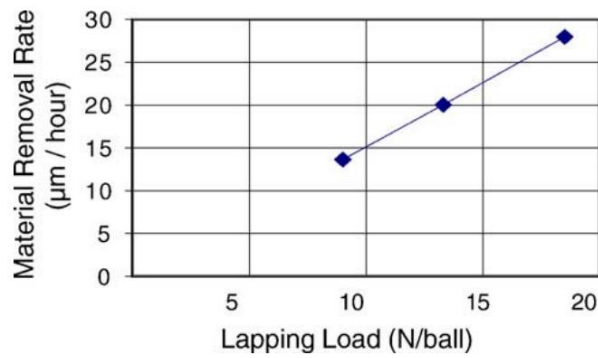


Figura 19 Influenza del carico applicato sul tasso di materiale asportato

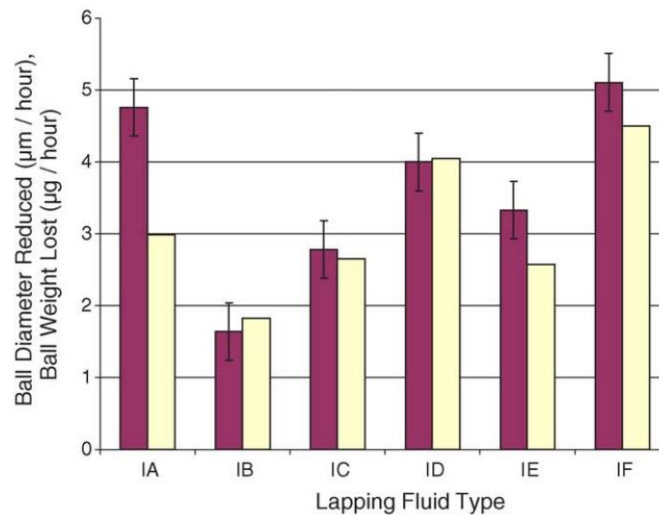


Figura 18 Influenza della tipologia di lubro-refrigerante sul tasso di materiale asportato

Come si può notare il carico applicato risulta il fattore più influente in relazione al tasso di rimozione del materiale. La massima rimozione di materiale è stata raggiunta con un carico di 43 N/sfera. Con un carico di lappatura estremamente elevato di 78 e 107 N/sfera, il tasso di rimozione di materiale è diminuito e sono stati riscontrati elevati errori di ovalità e danni significativi alla superficie e alla sotto-superficie.

La velocità di rotazione della mola è un fattore significativo se assume valori compresi tra 8,5 RPM e 169 RPM. Il tasso di rimozione del materiale rimane infatti costante per velocità comprese tra 270 RPM e 500 RPM.

Diversi lubro-refrigeranti hanno influenzato il tasso di rimozione del materiale a bassi carichi, ma si è notata una diminuzione dell'influenza di tale parametro all'aumentare dei carichi di lappatura.

Si è inoltre notato come il tasso di rimozione del materiale sulle sfere di tipo 1, contraddistinte da una maggiore durezza, ma minore tenacità alla frattura è 3-4 volte superiore a quelle del tipo 2.

2.3.7 Data-based Probe for Bearing Balls using Design Expert with Biodegradable Media [17]

In questo studio si è voluto esplorare l'utilizzo di un mezzo biodegradabile realizzato con *Aloe Vera* e carburo di silicio come abrasivo, in aggiunta ai mezzi convenzionali a base di olio. Velocità di rotazione del mandrino (RPM), Tempo (minuti), forza (N) e concentrazione di abrasivo sono stati considerati come variabili di processo mentre il *PISF*, *MRR* e l'ovalità della superficie sono stati considerati risposte. La campagna sperimentale è stata realizzata attraverso la tecnica del DOE. I risultati collezionati dai vari test sono dunque stati analizzati attraverso la tecnica dell'*ANOVA*.

A seguito di tali analisi si sono ottenuti ottimi risultati relativi all'utilizzo dell'aloè vera con carburi di silicio. Il valore massimo di *PISF* ottenuto è di 82.3% mentre per l'*MRR* e l'ovalità si sono ottenuti valori di 7.6 mg/min 9.05µm.

Il massimo *PISF* è stato raggiunto con

- 672 rpm
- 7.5 N
- 37.5% per la concentrazione di abrasivo
- 165 minuti

Il massimo *MRR* è stato ottenuto con

- 1568 rpm
- 75 minuti
- 37,5% per la concentrazione di abrasivo
- 7,5 N

La massima ovalità è stata ottenuta con

- 568 rpm, 75
- 37.5% per la concentrazione di abrasivo
- 7.5 N

3. CONFRONTO TRA SOFTWARE MINITAB E RSTUDIO SU DATI LAVORO PRECEDENTE

La simulazione sul software *Rstudio* è stata pensata come un'ulteriore verifica del lavoro svolto nel precedente elaborato in modo da poter ottenere dei risultati privi di eventuali errori dovuti al metodo di lavoro seguito dal software *Minitab*. Analogamente, tale analisi, permette di individuare eventuali errori che potrebbero essere dovuti al metodo di lavoro del software *Rstudio*.

Inoltre, tale simulazione, è volta alla creazione di un precedente su questo software in modo da facilitare le successive analisi, le quali potrebbero essere realizzate sia su *Minitab*, sia su *Rstudio* oppure esclusivamente su *Rstudio*.

Per una migliore comprensione sia del lavoro precedente sia del funzionamento dei due software è stato deciso di ripetere l'analisi sul software *Minitab*. Tale simulazione permette inoltre di confrontare gli output dei due software generati a partire dai medesimi dati. Si evita infatti di ottenere delle differenze dovute all'approssimazione con cui sono stati riportati i dati nel lavoro precedente.

Nel proseguo della trattazione si procederà effettuando vari step prima sul software *Minitab* e dopo sul software *Rstudio*.

Prima di iniziare l'analisi si riportano le tabelle dell'*ANOVA* relative al lavoro precedente. Queste saranno poi confrontate con gli output ottenuti con la nuova analisi. Le analisi su *Minitab* relative al lavoro precedente saranno indicate dalla dicitura *old*. Le nuove analisi su *Minitab* saranno indicate dalla dicitura *new*.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	2,38194	0,79398	10,26	0,001
Linear	2	2,10200	1,05100	13,58	0,001
Pressure	1	0,76646	0,76646	9,91	0,008
RPM	1	1,33554	1,33554	17,26	0,001
2-Way Interaction	1	0,27994	0,27994	3,62	0,081
RPM*Coolant flow	1	0,27994	0,27994	3,62	0,081
Error	12	0,92852	0,07738		
Lack-of-Fit	11	0,92132	0,08376	11,63	0,225
Pure Error	1	0,00720	0,00720		
Total	15	3,31046			

Figura 20 cut rated minitab "old"

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	199,46	66,486	6,83	0,006
Square	2	158,79	79,396	8,15	0,006
Pressure*Pressure	1	53,94	53,940	5,54	0,036
Coolant flow*Coolant flow	1	155,84	155,845	16,00	0,002
2-Way Interaction	1	40,67	40,665	4,17	0,064
RPM*Coolant flow	1	40,67	40,665	4,17	0,064
Error	12	116,88	9,740		
Lack-of-Fit	11	95,04	8,640	0,40	0,860
Pure Error	1	21,85	21,846		
Total	15	316,34			

Figura 21 Vdw Minitab "old"

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	93,037	31,012	7,55	0,004
Square	2	65,458	32,729	7,97	0,006
Pressure*Pressure	1	59,892	59,892	14,58	0,002
Coolant flow*Coolant flow	1	32,470	32,470	7,91	0,016
2-Way Interaction	1	27,579	27,579	6,72	0,024
Pressure*RPM	1	27,579	27,579	6,72	0,024
Error	12	49,279	4,107		
Lack-of-Fit	11	42,134	3,830	0,54	0,801
Pure Error	1	7,144	7,144		
Total	15	142,316			

Figura 22 M1 minitab "old"

3.1 PRIMA PARTE DELL' ANALISI

Nel proseguo della trattazione verrà spiegato anche il metodo seguito sul software *Minitab* oltre al metodo seguito sul software *Rstudio*. Tutta la trattazione verrà spiegata nel dettaglio per la risposta *Cutratedmed*. Per le risposte *Vdwmed* e *MI* verranno presentati solo gli output in quanto il metodo utilizzato è lo stesso.

3.1.1 Analisi su *Minitab*

L'analisi sul software *Minitab* inizia con la scelta del piano sperimentale e di conseguenza del numero di prove da eseguire. Tale scelta è stata effettuata nel lavoro precedente ed è ricaduta nel “*central composite design*”. Impostando il numero di fattori ed i corrispettivi livelli, *Minitab* crea dunque il piano sperimentale.

Si ricordano sia i fattori sia i rispettivi livelli:

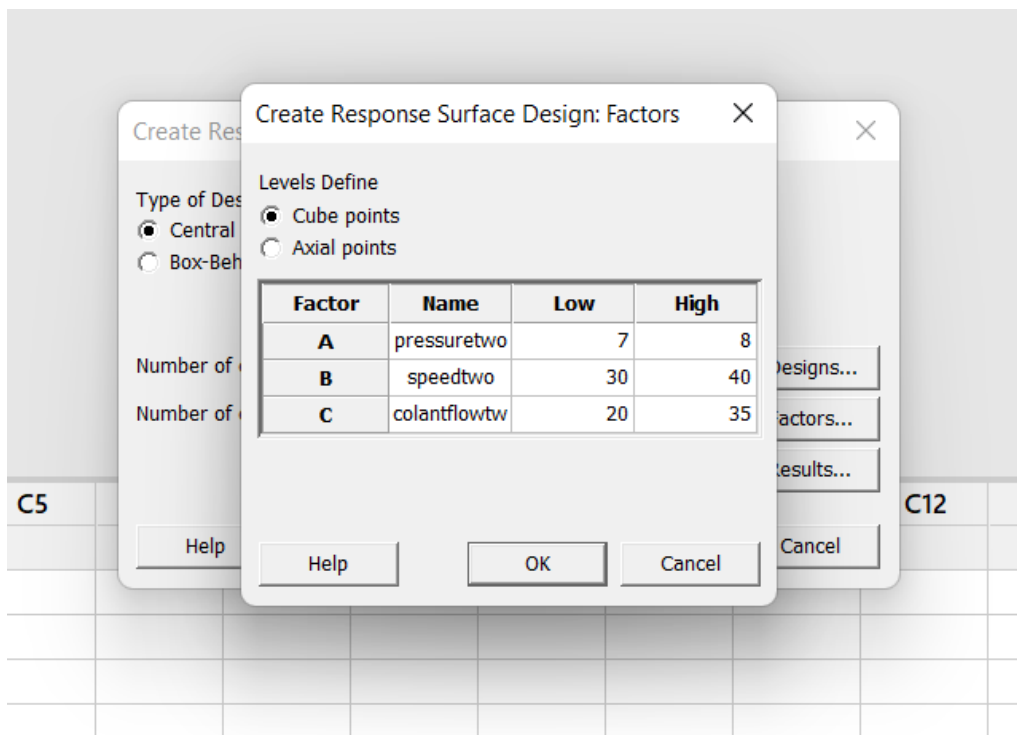


Figura 23 impostazione di fattori e livelli su *Minitab*

Si riporta di seguito il piano sperimentale creato da *Minitab*

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8 <input checked="" type="checkbox"/>	C9 <input checked="" type="checkbox"/>	C10 <input checked="" type="checkbox"/>
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	pressione	velocità	portata	cutratedmed	Vdwmed	M1med
1	11	1	-1	1	7,5	30	27,5	4,390	82,080	83,190
2	7	2	1	1	7,0	40	35,0	4,945	87,380	84,450
3	6	3	1	1	8,0	30	35,0	4,385	81,400	85,195
4	15	4	0	1	7,5	35	27,5	4,730	73,600	79,450
5	12	5	-1	1	7,5	40	27,5	4,500	83,610	87,790
6	14	6	-1	1	7,5	35	35,0	4,270	87,720	85,430
7	2	7	1	1	8,0	30	20,0	4,580	85,160	84,865
8	13	8	-1	1	7,5	35	20,0	4,880	84,280	88,760
9	10	9	-1	1	8,0	35	27,5	4,460	70,990	79,920
10	3	10	1	1	7,0	40	20,0	4,670	79,565	82,055
11	16	11	0	1	7,5	35	27,5	4,850	80,210	83,230
12	1	12	1	1	7,0	30	20,0	4,155	85,880	80,805
13	4	13	1	1	8,0	40	20,0	5,090	78,925	79,380
14	5	14	1	1	7,0	30	35,0	3,460	81,820	80,635
15	8	15	1	1	8,0	40	35,0	5,425	81,335	80,890
16	9	16	-1	1	7,0	35	27,5	3,950	77,860	78,580

Figura 24 piano sperimentale creato con minitab

Nelle colonne “C8”, “C9” e “C10” vengono dunque riportate le risposte *Cutratedmed*, *Vdwmed* e *M1med*

A questo punto è possibile effettuare le varie analisi statistiche previste dal metodo del *DOE*. In particolare, ci si è concentrati sulla tabella dell'*ANOVA*. In questa prima fase si è considerato il contributo di tutti i fattori e delle varie combinazioni.

Si riporta di seguito la tabella dell'*ANOVA* trovata.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	2,66893	0,29655	2,79	0,112
Linear	3	2,18053	0,72684	6,85	0,023
pressione	1	0,76176	0,76176	7,18	0,037
velocità	1	1,33956	1,33956	12,62	0,012
portata	1	0,07921	0,07921	0,75	0,421
Square	3	0,14264	0,04755	0,45	0,728
pressione*pressione	1	0,09972	0,09972	0,94	0,370
velocità*velocità	1	0,00546	0,00546	0,05	0,828
portata*portata	1	0,08122	0,08122	0,77	0,415
2-Way Interaction	3	0,34576	0,11525	1,09	0,424
pressione*velocità	1	0,02531	0,02531	0,24	0,643
pressione*portata	1	0,03920	0,03920	0,37	0,566
velocità*portata	1	0,28125	0,28125	2,65	0,155
Error	6	0,63665	0,10611		
Lack-of-Fit	5	0,62945	0,12589	17,48	0,180
Pure Error	1	0,00720	0,00720		
Total	15	3,30558			

Figura 25 tabella ANOVA cutratedmed new

Tale tabella non viene confrontata con quelle presenti nel lavoro precedente in quanto, in tale lavoro, sono riportate solo le tabelle relative ai contributi dei fattori e delle loro combinazioni più rilevanti.

3.1.2 Analisi su Rstudio

Come primo step si riportano i dati acquisiti relativi alla seconda campagna sperimentale in un file Excel. Tali dati sono gli stessi utilizzati nell'analisi su *Minitab*».

1. Il file Excel viene importato attraverso la funzione “**read.csv()**”. Questa funzione permette di importare un file di testo su *Rstudio*, per tale motivo occorre trasformare il file Excel in questo tipo di file andando a modificare l'estensione “.xlsx” del file in “.csv”.
2. La funzione “**read.csv**” va dunque a creare un file “lista”, rinominato come *TESTtwo*, il quale è suddiviso in righe e colonne esattamente come il file Excel di partenza.
1. Oltre ai dati vengono inoltre caricate alcune “librerie” del software, le quali saranno necessarie alla realizzazione dell'intera analisi

```
1 library(broom)
2 library(tidyverse)
3 library(rsm)
4 library(EnvStats)
5 library(apaTables)
6 library(sjPlot)
7
8 #importare il file .csv su Rstudio
9
10 TESTtwo=read.csv("C:\\Users\\Nirvana\\Desktop\\POLITO\\MAGISTRALE\\TESI\\ANALISI_SU_R\\TEST_GABRIELE_2.5.csv",
11                 sep=";")
12
```

Figura 26 funzione read.csv()

2. Viene ora creato il piano sperimentale relativo al metodo del “Central composite design” mediante la funzione “**ccd()**”. Il piano sperimentale così creato viene salvato in file di tipo “lista”. Tale funzione individua il livello più basso di un fattore con “-1”, il livello intermedio con “0” e il livello più alto con “1”. Tali livelli sono riportati nelle colonne “x1”, “x2” e “x3”. Si riporta di seguito il file così creato.

	run.order	std.order	x1	x2	x3	Block
1	1	1	-1	-1	-1	1
2	2	2	1	-1	-1	1
3	3	3	-1	1	-1	1
4	4	4	1	1	-1	1
5	5	5	-1	-1	1	1
6	6	6	1	-1	1	1
7	7	7	-1	1	1	1
8	8	8	1	1	1	1
9	9	9	0	0	0	1
10	1	1	-1	0	0	2
11	2	2	1	0	0	2
12	3	3	0	-1	0	2
13	4	4	0	1	0	2
14	5	5	0	0	-1	2
15	6	6	0	0	1	2
16	7	7	0	0	0	2

Figura 27 piano sperimentale creato con Rstudio

3. Per ottenere i livelli reali dei tre fattori vengono aggiunte altre tre colonne al file appena creato. Tali colonne sono create a partire dalle colonne “x1”, “x2” e “x3” sfruttando la formula generale:

$$\frac{\text{livello}_1 - \text{livello}_{-1}}{2} * x_i + \text{livello}_0$$

In questo modo si ottengono le colonne *pressuret看o*, *speedtwo* e *colantflowtwo*. A questo punto si riportano le tre risposte contenute nel file lista “TESTtwo”. Risulta necessario controllare che per ogni set di fattori corrisponda sulla stessa riga il giusto set di risposte. Se ciò non avviene bisogna intervenire sul file .csv di partenza.

Si riportano di seguito le funzioni utilizzate e il piano sperimentale completo così ottenuto.

```

13 # creare un dataframe con fattori e risposte
14
15 df=ccd(3, n0=1, randomize=FALSE, alpha="faces")
16
17 df$pressuret看o=0.5*df$x1 + 7.5
18 df$speedtwo=5*df$x2+ 35
19 df$colantflowtwo=7.5*df$x3+27.5
20
21 df$vdw=TESTtwo$VDWmed
22 df$m1=TESTtwo$M1med
23 df$cutrated=TESTtwo$CUT.RATEmed
24

```

Figura 28 set di funzioni utilizzate per creare il piano sperimentale in Rstudio

run.order	std.order	x1	x2	x3	Block	pressuret看o	speedtwo	colantflowtwo	vdw	m1	cutrated	
1	1	1	-1	-1	-1	1	7.0	30	20.0	85.880	80.805	4.155
2	2	2	1	-1	-1	1	8.0	30	20.0	85.160	84.865	4.580
3	3	3	-1	1	-1	1	7.0	40	20.0	79.565	82.055	4.670
4	4	4	1	1	-1	1	8.0	40	20.0	78.925	79.380	5.090
5	5	5	-1	-1	1	1	7.0	30	35.0	81.820	80.635	3.460
6	6	6	1	-1	1	1	8.0	30	35.0	81.400	85.195	4.385
7	7	7	-1	1	1	1	7.0	40	35.0	87.380	84.450	4.945
8	8	8	1	1	1	1	8.0	40	35.0	81.335	80.890	5.425
9	9	9	0	0	0	1	7.5	35	27.5	73.600	79.450	4.730
10	1	1	-1	0	0	2	7.0	35	27.5	77.860	78.580	3.950
11	2	2	1	0	0	2	8.0	35	27.5	70.990	79.920	4.460
12	3	3	0	-1	0	2	7.5	30	27.5	82.080	83.190	4.390
13	4	4	0	1	0	2	7.5	40	27.5	83.610	87.790	4.500
14	5	5	0	0	-1	2	7.5	35	20.0	84.280	88.760	4.880
15	6	6	0	0	1	2	7.5	35	35.0	87.720	85.430	4.270
16	7	7	0	0	0	2	7.5	35	27.5	80.210	83.230	4.850

Figura 29 piano sperimentale completo creato con Rstudio

Per facilitare il confronto con l'output ottenuto attraverso *Minitab* verranno utilizzati i livelli indicati con -1,0 e 1. *Minitab*, infatti fornisce i coefficienti dell'equazione di regressione sia in unità codificate (-1,0 e 1), sia in unità non codificate (7, 7.5 e 8 ad esempio per la pressione). In unità codificate *Minitab* crea una tabella in cui oltre ai coefficienti dell'equazione di regressione aggiunge i termini:

- “SE Coef”
- “T – Value”
- “P – Value”
- VIF

È stato deciso di creare il piano sperimentale completo in modo da semplificare l'aggiunta delle varie risposte nel file excel di partenza. Le successive analisi saranno distinte in analisi in unità codificate e analisi in unità non codificate.

4. Viene ora realizzata l'ANOVA attraverso la funzione "rsm()". In tale funzione vengono inseriti i vettori relativi ai tre fattori e la risposta in esame. In particolare, i tre fattori sono inseriti in tre sotto funzioni ovvero:

- FO il quale indica "First Order"
- TWI il quale indica i prodotti tra i tre fattori
- PQ il quale indica "Pure Quadratic"

In questo modo si ottiene una tabella dell'ANOVA parziale all'interno della quale si hanno come voci i modelli relativi agli elementi di primo ordine, ai prodotti misti e ai quadrati puri. Tali termini corrispondono alle voci presenti nella tabella ottenuta con *Minitab* indicati da *Linear*, *Square* e *2-Way Interaction*. Per ottenere gli altri termini è necessario ripetere la funzione inserendo al posti di TWI e PQ tutte le varie combinazioni contenute all'interno della funzione "I()". In quanto la funzione "rsm()" necessita obbligatoriamente di un primo ordine non è possibile sostituire la funzione FO. Di seguito si riportano le due tabelle così ottenute.

```
Response: cutrated
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	2.18053	0.72684	6.8501	0.0230
TWI(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	0.34576	0.11525	1.0862	0.4238
PQ(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	0.14264	0.04755	0.4481	0.7277
Residuals	6	0.63665	0.10611		
Lack of fit	5	0.62945	0.12589	17.4846	0.1795
Pure error	1	0.00720	0.00720		

Figura 30 tabella Anova ottenuta con le sottofunzioni FO,PQ e TWI

```
Response: cutrated
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	2.18053	0.72684	6.8501	0.0230
I(pressuretwo * speedtwo)	1	0.02531	0.02531	0.2386	0.6426
I(pressuretwo * colantflowtwo)	1	0.03920	0.03920	0.3694	0.5656
I(speedtwo * colantflowtwo)	1	0.28125	0.28125	2.6506	0.1546
I(pressuretwo^2)	1	0.03128	0.03128	0.2948	0.6067
I(speedtwo^2)	1	0.03014	0.03014	0.2840	0.6132
I(colantflowtwo^2)	1	0.08122	0.08122	0.7654	0.4153
Residuals	6	0.63665	0.10611		
Lack of fit	5	0.62945	0.12589	17.4846	0.1795
Pure error	1	0.00720	0.00720		

Figura 31 tabella ANOVA ottenuta con la sottofunzione I

Le due tabelle così ottenute riassumono la tabella creata attraverso il software *Minitab*.

3.1.3 Confronto tra *Rstudio* e *Minitab*

Si riportano ora le varie tabelle dell'ANOVA ottenute attraverso i due software. Sia nel caso di analisi in unità codificate, sia nel caso di analisi in unità non codificate le tabelle dell'ANOVA individuate da *Rstudio* sono le stesse. In quanto attraverso il software *Rstudio* si sono ottenute due tabelle verranno confrontate separatamente. Nella tabella ottenuta attraverso il software *Minitab* verranno evidenziati i termini relativi al confronto in atto.

Response: cutrated					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	2.18053	0.72684	6.8501	0.0230
TWI(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	0.34576	0.11525	1.0862	0.4238
PQ(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	0.14264	0.04755	0.4481	0.7277
Residuals	6	0.63665	0.10611		
Lack of fit	5	0.62945	0.12589	17.4846	0.1795
Pure error	1	0.00720	0.00720		

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	2,66893	0,29655	2,79	0,112
Linear	3	2,18053	0,72684	6,85	0,023
pressione	1	0,76176	0,76176	7,18	0,037
velocità	1	1,33956	1,33956	12,62	0,012
portata	1	0,07921	0,07921	0,75	0,421
Square	3	0,14264	0,04755	0,45	0,728
pressione*pressione	1	0,09972	0,09972	0,94	0,370
velocità*velocità	1	0,00546	0,00546	0,05	0,828
portata*portata	1	0,08122	0,08122	0,77	0,415
2-Way Interaction	3	0,34576	0,11525	1,09	0,424
pressione*velocità	1	0,02531	0,02531	0,24	0,643
pressione*portata	1	0,03920	0,03920	0,37	0,566
velocità*portata	1	0,28125	0,28125	2,65	0,155
Error	6	0,63665	0,10611		
Lack-of-Fit	5	0,62945	0,12589	17,48	0,180
Pure Error	1	0,00720	0,00720		
Total	15	3,30558			

Figura 32 confronto la tabella *Rstudio* e tabella *Minitab*

Si nota una corrispondenza perfetta tra gli output generati dai due software a meno di una diversa approssimazione per i termini relativi al *F-value* e *P-value* (in *Rstudio* $Pr(>F)$)

```

Response: cutrated
Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FO(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo) 3 2.18053 0.72684 6.8501 0.0230
I(pressuretwo * speedtwo) 1 0.02531 0.02531 0.2386 0.6426
I(pressuretwo * colantflowtwo) 1 0.03920 0.03920 0.3694 0.5656
I(speedtwo * colantflowtwo) 1 0.28125 0.28125 2.6506 0.1546
I(pressuretwo^2) 1 0.03128 0.03128 0.2948 0.6067
I(speedtwo^2) 1 0.03014 0.03014 0.2840 0.6132
I(colantflowtwo^2) 1 0.08122 0.08122 0.7654 0.4153
Residuals 6 0.63665 0.10611
Lack of fit 5 0.62945 0.12589 17.4846 0.1795
Pure error 1 0.00720 0.00720

```

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	2,66893	0,29655	2,79	0,112
Linear	3	2,18053	0,72684	6,85	0,023
pressione	1	0,76176	0,76176	7,18	0,037
velocità	1	1,33956	1,33956	12,62	0,012
portata	1	0,07921	0,07921	0,75	0,421
Square	3	0,14264	0,04755	0,45	0,728
pressione*pressione	1	0,09972	0,09972	0,94	0,370
velocità*velocità	1	0,00546	0,00546	0,05	0,828
portata*portata	1	0,08122	0,08122	0,77	0,415
2-Way Interaction	3	0,34576	0,11525	1,09	0,424
pressione*velocità	1	0,02531	0,02531	0,24	0,643
pressione*portata	1	0,03920	0,03920	0,37	0,566
velocità*portata	1	0,28125	0,28125	2,65	0,155
Error	6	0,63665	0,10611		
Lack-of-Fit	5	0,62945	0,12589	17,48	0,180
Pure Error	1	0,00720	0,00720		
Total	15	3,30558			

Figura 33 confronto 2a tabella Rstudio tabella Minitab

Si nota nuovamente una corrispondenza perfetta tra gli output generati dai due software a meno di una diversa approssimazione per i termini relativi al *F-value* e *P-value*. Ciò risulta veritiero solo per i termini evidenziati in verde. Nei termini evidenziati in arancione, ovvero i due termini di secondo grado relativi alla pressione ($pressuretwo^2$) e la velocità ($speedtwo^2$) si notano delle differenze. Queste non riguardano però il termine di secondo grado relativo alla portata ($colantflowtwo^2$) il quale ha una corrispondenza perfetta tra i due software.

Per comprendere il peso di tali differenze all'interno dell'analisi è opportuno osservare un secondo output. Mediante la funzione "rsm()" in *Rstudio* è possibile individuare i coefficienti moltiplicativi dei vari termini all'interno dell'equazione di regressione. Tale output viene generato per ogni termine indipendentemente che si utilizzino le sottofunzioni "FO()", "PQ()" e "TWI()" oppure la sottofunzione "I()". Si riportano di seguito gli output dei due software.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-38.2583056	44.2451117	-0.8647	0.4204
pressuretwo	12.4951522	12.1756756	1.0262	0.3444
speedtwo	-0.0229983	0.6651843	-0.0346	0.9735
colantflowtwo	-0.4984835	0.3213645	-1.5511	0.1718
I(pressuretwo * speedtwo)	-0.0225000	0.0460668	-0.4884	0.6426
I(pressuretwo * colantflowtwo)	0.0186667	0.0307112	0.6078	0.5656
I(speedtwo * colantflowtwo)	0.0050000	0.0030711	1.6281	0.1546
I(pressuretwo^2)	-0.7779310	0.8024732	-0.9694	0.3698
I(speedtwo^2)	0.0018207	0.0080247	0.2269	0.8280
I(colantflowtwo^2)	0.0031203	0.0035665	0.8749	0.4153

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned}
 \text{cutratedmed} = & -38,3 + 12,5 \text{ pressione} - 0,023 \text{ velocità} - 0,498 \text{ portata} \\
 & - 0,778 \text{ pressione*pressione} + 0,00182 \text{ velocità*velocità} \\
 & + 0,00312 \text{ portata*portata} - 0,0225 \text{ pressione*velocità} \\
 & + 0,0187 \text{ pressione*portata} + 0,00500 \text{ velocità*portata}
 \end{aligned}$$

Figura 34 confronto coefficienti equazione di regressione *Rstudio* e *Minitab* analisi in unità non codificate

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	4.529655	0.154217	29.3721	1.032e-07	***
x1	0.276000	0.103009	2.6794	0.03657	*
x2	0.366000	0.103009	3.5531	0.01203	**
x3	-0.089000	0.103009	-0.8640	0.42078	
x1:x2	-0.056250	0.115167	-0.4884	0.64259	
x1:x3	0.070000	0.115167	0.6078	0.56559	
x2:x3	0.187500	0.115167	1.6281	0.15463	
x1^2	-0.194483	0.200618	-0.9694	0.36978	
x2^2	0.045517	0.200618	0.2269	0.82805	
x3^2	0.175517	0.200618	0.8749	0.41528	

Coded Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	4,530	0,154	29,37	0,000	
pressione	0,276	0,103	2,68	0,037	1,00
velocità	0,366	0,103	3,55	0,012	1,00
portata	-0,089	0,103	-0,86	0,421	1,00
pressione*pressione	-0,194	0,201	-0,97	0,370	1,42
velocità*velocità	0,046	0,201	0,23	0,828	1,42
portata*portata	0,176	0,201	0,87	0,415	1,42
pressione*velocità	-0,056	0,115	-0,49	0,643	1,00
pressione*portata	0,070	0,115	0,61	0,566	1,00
velocità*portata	0,188	0,115	1,63	0,155	1,00

Figura 35 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab analisi in unità codificate

Si nota nuovamente una corrispondenza perfetta tra i coefficienti trovati dai due software a meno di una diversa approssimazione. Ne risulta che le differenze riscontrate nella tabella dell'ANOVA non vanno ad intaccare la definizione del modello.

3.1.4 Risultati *Vdwtwo* e *MItwo*

3.1.4.1 *Vdwtwo*

Response: vdw					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	28.063	9.354	1.0058	0.45257
TWI(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	47.804	15.935	1.7133	0.26292
PQ(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	184.688	61.563	6.6191	0.02483
Residuals	6	55.805	9.301		
Lack of fit	5	33.959	6.792	0.3109	0.86713
Pure error	1	21.846	21.846		

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	260,555	28,951	3,11	0,090
Linear	3	28,063	9,354	1,01	0,453
pressione	1	21,594	21,594	2,32	0,178
velocità	1	3,053	3,053	0,33	0,588
portata	1	3,416	3,416	0,37	0,567
Square	3	184,688	61,563	6,62	0,025
pressione*pressione	1	73,615	73,615	7,91	0,031
velocità*velocità	1	25,924	25,924	2,79	0,146
portata*portata	1	104,331	104,331	11,22	0,015
2-Way Interaction	3	47,804	15,935	1,71	0,263
pressione*velocità	1	3,843	3,843	0,41	0,544
pressione*portata	1	3,258	3,258	0,35	0,576
velocità*portata	1	40,703	40,703	4,38	0,081
Error	6	55,805	9,301		
Lack-of-Fit	5	33,959	6,792	0,31	0,867
Pure Error	1	21,846	21,846		
Total	15	316,360			

Figura 36 confronto 1a tabella Rstudio e tabella Minitab Vdw

Response: vdw

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	28.063	9.354	1.0058	0.45257
I(pressuretwo * speedtwo)	1	3.843	3.843	0.4132	0.54410
I(pressuretwo * colantflowtwo)	1	3.258	3.258	0.3503	0.57557
I(speedtwo * colantflowtwo)	1	40.703	40.703	4.3763	0.08138
I(pressuretwo^2)	1	2.938	2.938	0.3159	0.59443
I(speedtwo^2)	1	77.419	77.419	8.3239	0.02787
I(colantflowtwo^2)	1	104.331	104.331	11.2175	0.01543
Residuals	6	55.805	9.301		
Lack of fit	5	33.959	6.792	0.3109	0.86713
Pure error	1	21.846	21.846		

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	260,555	28,951	3,11	0,090
Linear	3	28,063	9,354	1,01	0,453
pressione	1	21,594	21,594	2,32	0,178
velocità	1	3,053	3,053	0,33	0,588
portata	1	3,416	3,416	0,37	0,567
Square	3	184,688	61,563	6,62	0,025
pressione*pressione	1	73,615	73,615	7,91	0,031
velocità*velocità	1	25,924	25,924	2,79	0,146
portata*portata	1	104,331	104,331	11,22	0,015
2-Way Interaction	3	47,804	15,935	1,71	0,263
pressione*velocità	1	3,843	3,843	0,41	0,544
pressione*portata	1	3,258	3,258	0,35	0,576
velocità*portata	1	40,703	40,703	4,38	0,081
Error	6	55,805	9,301		
Lack-of-Fit	5	33,959	6,792	0,31	0,867
Pure Error	1	21,846	21,846		
Total	15	316,360			

Figura 37 confronto 2a tabella Rstudio e Minitab Vdw

Gli stessi commenti effettuati per l'analisi relativa al *Cutrate* possono essere fatti anche per il *Vdw*. Per tale motivo è opportuno controllare i coefficienti dell'equazione di regressione

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	78.77448	1.44383	54.5593	2.546e-09 ***
x1	-1.46950	0.96440	-1.5237	0.17841
x2	-0.55250	0.96440	-0.5729	0.58753
x3	0.58450	0.96440	0.6061	0.56667
x1:x2	-0.69313	1.07824	-0.6428	0.54410
x1:x3	-0.63813	1.07824	-0.5918	0.57557
x2:x3	2.25562	1.07824	2.0920	0.08138 .
x1^2	-5.28422	1.87826	-2.8134	0.03062 *
x2^2	3.13578	1.87826	1.6695	0.14606
x3^2	6.29078	1.87826	3.3493	0.01543 *

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	78.77	1.44	54.56	0.000	
pressione	-1,469	0,964	-1,52	0,178	1,00
velocità	-0,553	0,964	-0,57	0,588	1,00
portata	0,584	0,964	0,61	0,567	1,00
pressione*pressione	-5,28	1,88	-2,81	0,031	1,42
velocità*velocità	3,14	1,88	1,67	0,146	1,42
portata*portata	6,29	1,88	3,35	0,015	1,42
pressione*velocità	-0,69	1,08	-0,64	0,544	1,00
pressione*portata	-0,64	1,08	-0,59	0,576	1,00
velocità*portata	2,26	1,08	2,09	0,081	1,00

Figura 38 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab analisi in unità codificate

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-898.160736	414.239367	-2.1682	0.07324 .
pressuretvo	328.497782	113.993252	2.8817	0.02799 *
speedtvo	-8.465422	6.227706	-1.3593	0.22291
colantflowtvo	-6.902048	3.008735	-2.2940	0.06160 .
I(pressuretvo * speedtvo)	-0.277250	0.431295	-0.6428	0.54410
I(pressuretvo * colantflowtvo)	-0.170167	0.287530	-0.5918	0.57557
I(speedtvo * colantflowtvo)	0.060150	0.028753	2.0920	0.08138 .
I(pressuretvo^2)	-21.136897	7.513055	-2.8134	0.03062 *
I(speedtvo^2)	0.125431	0.075131	1.6695	0.14606
I(colantflowtvo^2)	0.111836	0.033391	3.3493	0.01543 *

Regression Equation in Uncoded Units

$$Vdwmed = -898 + 328 \text{ pressione} - 8,47 \text{ velocità} - 6,90 \text{ portata} + 21,14 \text{ pressione*pressione} + 0,1254 \text{ velocità*velocità} + 0,1118 \text{ portata*portata} - 0,277 \text{ pressione*velocità} - 0,170 \text{ pressione*portata} + 0,0602 \text{ velocità*portata}$$

Figura 39 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab Vdw

Come nel caso precedente si nota nuovamente una corrispondenza perfetta tra i coefficienti trovati dai due software a meno di una diversa approssimazione. Ne risulta che le differenze riscontrate nella tabella dell'ANOVA non vanno ad intaccare la definizione del modello.

3.1.5 Mltwo

Response: m1

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	1.443	0.4810	0.0695	0.97417
TwI(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	29.356	9.7852	1.4129	0.32797
PQ(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	69.937	23.3124	3.3662	0.09601
Residuals	6	41.553	6.9254		
Lack of fit	5	34.408	6.8817	0.9633	0.64501
Pure error	1	7.144	7.1442		

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	100,736	11,1929	1,62	0,288
Linear	3	1,443	0,4810	0,07	0,974
pressione	1	1,388	1,3876	0,20	0,670
velocità	1	0,002	0,0016	0,00	0,989
portata	1	0,054	0,0540	0,01	0,932
Square	3	69,937	23,3124	3,37	0,096
pressione*pressione	1	64,155	64,1550	9,26	0,023
velocità*velocità	1	4,503	4,5034	0,65	0,451
portata*portata	1	22,355	22,3554	3,23	0,123
2-Way Interaction	3	29,356	9,7852	1,41	0,328
pressione*velocità	1	27,584	27,5839	3,98	0,093
pressione*portata	1	0,019	0,0185	0,00	0,960
velocità*portata	1	1,753	1,7531	0,25	0,633
Error	6	41,553	6,9254		
Lack-of-Fit	5	34,408	6,8817	0,96	0,645
Pure Error	1	7,144	7,1442		
Total	15	142,289			

Figura 40 confronto la tabella Rstudio e tabella Minitab M1

Response: m1

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	1.443	0.481	0.0695	0.97417
I(pressuretwo * speedtwo)	1	27.584	27.584	3.9830	0.09297
I(pressuretwo * colantflowtwo)	1	0.019	0.019	0.0027	0.96043
I(speedtwo * colantflowtwo)	1	1.753	1.753	0.2531	0.63280
I(pressuretwo^2)	1	32.949	32.949	4.7576	0.07194
I(speedtwo^2)	1	14.633	14.633	2.1130	0.19628
I(colantflowtwo^2)	1	22.355	22.355	3.2280	0.12252
Residuals	6	41.553	6.925		
Lack of fit	5	34.408	6.882	0.9633	0.64501
Pure error	1	7.144	7.144		

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	100,736	11,1929	1,62	0,288
Linear	3	1,443	0,4810	0,07	0,974
pressione	1	1,388	1,3876	0,20	0,670
velocità	1	0,002	0,0016	0,00	0,989
portata	1	0,054	0,0540	0,01	0,932
Square	3	69,937	23,3124	3,37	0,096
pressione*pressione	1	64,155	64,1550	9,26	0,023
velocità*velocità	1	4,503	4,5034	0,65	0,451
portata*portata	1	22,355	22,3554	3,23	0,123
2-Way Interaction	3	29,356	9,7852	1,41	0,328
pressione*velocità	1	27,584	27,5839	3,98	0,093
pressione*portata	1	0,019	0,0185	0,00	0,960
velocità*portata	1	1,753	1,7531	0,25	0,633
Error	6	41,553	6,9254		
Lack-of-Fit	5	34,408	6,8817	0,96	0,645
Pure Error	1	7,144	7,1442		
Total	15	142,289			

Figura 41 confronto 2a tabella Rstudio e tabella Minitab M1

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	83.235345	1.245893	66.8078	7.565e-10 ***
x1	0.372500	0.832191	0.4476	0.67014
x2	-0.012500	0.832191	-0.0150	0.98850
x3	0.073500	0.832191	0.0883	0.93250
x1:x2	-1.856875	0.930418	-1.9957	0.09297 .
x1:x3	-0.048125	0.930418	-0.0517	0.96043
x2:x3	0.468125	0.930418	0.5031	0.63280
x1^2	-4.933017	1.620767	-3.0436	0.02270 *
x2^2	1.306983	1.620767	0.8064	0.45078
x3^2	2.911983	1.620767	1.7967	0.12252

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	83,24	1,25	66,81	0,000	
pressione	0,372	0,832	0,45	0,670	1,00
velocità	-0,012	0,832	-0,02	0,989	1,00
portata	0,074	0,832	0,09	0,932	1,00
pressione*pressione	-4,93	1,62	-3,04	0,023	1,42
velocità*velocità	1,31	1,62	0,81	0,451	1,42
portata*portata	2,91	1,62	1,80	0,123	1,42
pressione*velocità	-1,857	0,930	-2,00	0,093	1,00
pressione*portata	-0,048	0,930	-0,05	0,960	1,00
velocità*portata	0,468	0,930	0,50	0,633	1,00

Figura 43 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab analisi in unità codificate

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-1.1149e+03	3.5745e+02	-3.1190	0.02061 *
pressuret看o	3.2308e+02	9.8366e+01	3.2844	0.01673 *
speedtwo	1.5653e+00	5.3739e+00	0.2913	0.78065
colantflowtwo	-3.1781e+00	2.5963e+00	-1.2241	0.26679
I(pressuret看o * speedtwo)	-7.4275e-01	3.7217e-01	-1.9957	0.09297 .
I(pressuret看o * colantflowtwo)	-1.2833e-02	2.4811e-01	-0.0517	0.96043
I(speedtwo * colantflowtwo)	1.2483e-02	2.4811e-02	0.5031	0.63280
I(pressuret看o^2)	-1.9732e+01	6.4831e+00	-3.0436	0.02270 *
I(speedtwo^2)	5.2279e-02	6.4831e-02	0.8064	0.45078
I(colantflowtwo^2)	5.1769e-02	2.8814e-02	1.7967	0.12252

Regression Equation in Uncoded Units

$$M1med = -1115 - 323,1 \text{ pressione} + 1,57 \text{ velocità} - 3,18 \text{ portata} - 19,73 \text{ pressione*pressione} + 0,0523 \text{ velocità*velocità} + 0,0518 \text{ portata*portata} - 0,743 \text{ pressione*velocità} - 0,013 \text{ pressione*portata} + 0,0125 \text{ velocità*portata}$$

Figura 42 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab M1

Come nel caso precedente si nota nuovamente una corrispondenza perfetta tra i coefficienti trovati dai due software a meno di una diversa approssimazione. Ne risulta che le differenze riscontrate nella tabella dell'ANOVA non vanno ad intaccare la definizione del modello.

3.2 SECONDA PARTE DELL' ANALISI

La seconda parte dell'analisi consiste nel considerare i soli fattori e le relative combinazioni realmente significative. Ogni output ottenuto sul software *Minitab* verrà dunque confrontato con il corrispettivo output ottenuto nel lavoro precedente evidenziando e commentando le eventuali differenze. In accordo con le scelte prese nel lavoro precedente i fattori con un valore di $P - value > \alpha = 0,1$ sono stati esclusi dal modello. Tutta la trattazione verrà spiegata nel dettaglio per la risposta “*Cutratedmed*”. Per le risposte “*Vdwmmed*” e “*MI*” verranno presentati solo gli output in quanto il metodo utilizzato è lo stesso.

3.2.1 Analisi su Minitab

Analizzando la tabella relativa alla nuova analisi compiuta sul software *Minitab* si ritengono rilevanti i termini *pressuretwo*, *speedtwo* e *speedtwo:colantflowtwo*. I restanti termini sono dunque eliminati dal proseguo dell'analisi.

Si vuole precisare che il software *Minitab* riporta un errore in quanto non compare il termine relativo alla portata come termine lineare. Il software permette comunque di continuare l'analisi indipendentemente dall'errore.

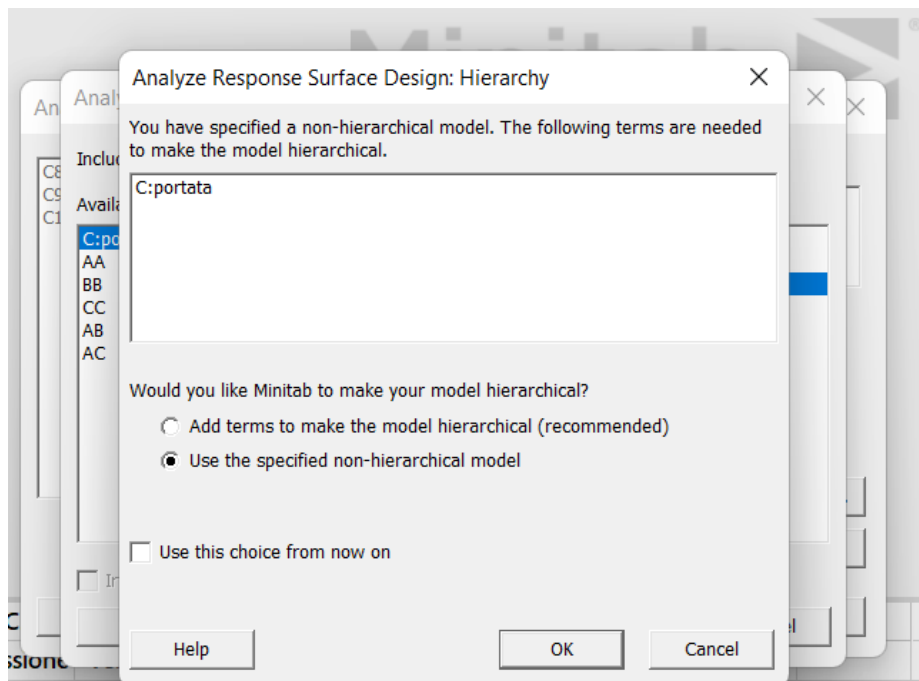


Figura 44 errore riportato da Minitab

Si riporta nella pagina seguente la tabella dell'ANOVA così calcolata. Viene inoltre riportata per confronto la tabella dell'ANOVA relativa al lavoro precedente.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	2,38257	0,79419	10,33	0,001
Linear	2	2,10132	1,05066	13,66	0,001
pressione	1	0,76176	0,76176	9,90	0,008
velocità	1	1,33956	1,33956	17,42	0,001
2-Way Interaction	1	0,28125	0,28125	3,66	0,080
velocità*portata	1	0,28125	0,28125	3,66	0,080
Error	12	0,92300	0,07692		
Lack-of-Fit	11	0,91581	0,08326	11,56	0,226
Pure Error	1	0,00720	0,00720		
Total	15	3,30558			

Figura 46 tabella ANOVA new

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	2,38194	0,79398	10,26	0,001
Linear	2	2,10200	1,05100	13,58	0,001
Pressure	1	0,76646	0,76646	9,91	0,008
RPM	1	1,33554	1,33554	17,26	0,001
2-Way Interaction	1	0,27994	0,27994	3,62	0,081
RPM*Coolant flow	1	0,27994	0,27994	3,62	0,081
Error	12	0,92852	0,07738		
Lack-of-Fit	11	0,92132	0,08376	11,63	0,225
Pure Error	1	0,00720	0,00720		
Total	15	3,31046			

Figura 45 tabella ANOVA old

Si notano delle differenze tra le due tabelle, le quali vanno ad interessare la seconda cifra decimale dei vari termini. Tali differenze possono essere dovute all'approssimazione con cui sono stati riportati i vari dati nel lavoro precedente. Tali differenze non riguardano però il *P-Value* e dunque il proseguo dell'analisi.

3.2.2 analisi su *Rstudio*

Per realizzare l'analisi su "Rstudiodio" relativa ai fattori e le relative combinazioni più significative si vanno a modificare le voci presenti all'interno della funzione "**rsm()**". Nell'analisi precedente su tale software si sono inserite all'interno della sottofunzione "**FO()**" tutti e tre i fattori, mentre si è sfruttata la sottofunzione "**I()**" per tutte le possibili combinazioni. In tale analisi si sono invece inseriti solo i fattori e le combinazioni con un *P-Value* < 0,1 in accordo con quanto deciso nel lavoro precedente.

```
53
54 ###ESEGUIRE L'ANOVA CONSIDERANDO SOLO LE COMBINAZIONI TRA I FATTORI PIÙ RILEVANTI
55
56 #CUTRATED
57 ANOVAcutrated2=rsm(cutrated~FO(pressuretwo,speedtwo)
58                      +speedtwo*colantflowtwo,data=df)
59
60 summary_ANOVAcutrated2=summary(ANOVAcutrated2)
61 summary_ANOVAcutrated2
```

Figura 47 funzione "rsm()" aggiornata

Si riporta di seguito la tabella dell' *ANOVA* risultante. In questo caso, essendo la sotto-funzione "**FO()**" necessaria per la funzione "**rsm()**" ed essendoci una sola sotto-funzione "**I()**", risulta superfluo creare due tabelle *ANOVA*.

```
Response: cutrated
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FO(pressuretwo, speedtwo)  2  2.10132  1.05066  13.6968  0.001033
colantflowtwo              1  0.07921  0.07921   1.0326  0.331377
speedtwo:colantflowtwo     1  0.28125  0.28125   3.6665  0.081871
Residuals                 11  0.84380  0.07671
Lack of fit                6  0.61033  0.10172   2.1785  0.205256
Pure error                  5  0.23347  0.04669
```

Figura 48 tabella "ANOVA" *Rstudio*

In tale tabella si nota la presenza del fattore *colantflowtwo*. Esattamente come in *Minitab* il software *Rstudio* identifica un errore non avendo tutti i fattori che compaiono nelle varie combinazioni come termini di primo ordine. A differenza del software *Minitab* non è possibile bypassare tale errore e dunque viene aggiunto di default il termine di primo ordine. Non essendo significativamente interessante tale termine deve essere considerato come una parte della voce "residuals".

3.2.3 Confronto tra *Rstudio* e *Minitab*

Si riportano ora le varie tabelle dell'ANOVA ottenute attraverso i due software. Per facilitare il confronto si riporta la tabella ottenuta con *Rstudio* su excel in modo da poter integrare la voce "colantflowtwo" all'interno della voce "residuals".

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(pressuretwo,speedtwo)	2	2,10132	1,05066	13,6968	0,001033
speedtwo:colantflowtwo	1	0,28125	0,28125	3,6665	0,081871
residuals	12	0,92301	0,076918		
Lack of fit	6	0,61033	0,101722	2,1785	0,205256
Pure error	5	0,23347	0,046694		

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	2,38257	0,79419	10,33	0,001
Linear	2	2,10132	1,05066	13,66	0,001
pressione	1	0,76176	0,76176	9,90	0,008
velocità	1	1,33956	1,33956	17,42	0,001
2-Way Interaction	1	0,28125	0,28125	3,66	0,080
velocità*portata	1	0,28125	0,28125	3,66	0,080
Error	12	0,92300	0,07692		
Lack-of-Fit	11	0,91581	0,08326	11,56	0,226
Pure Error	1	0,00720	0,00720		
Total	15	3,30558			

Figura 49 confronto *Rstudio* e *Minitab*

Si nota una corrispondenza perfetta tra gli output dei due software. Uniche eccezioni sono le voci relative all'errore puro e al *lack of fit*, le quale presentano valori differenti a partire dalla definizione dei gradi di libertà.

Per comprendere il peso di tali differenze si procede nuovamente con l'individuare i coefficienti moltiplicativi dei vari termini all'interno dell'equazione di regressione. In questo caso il software *Minitab* non è in grado di realizzare l'analisi in unità non codificate. Si riporta di seguito solo l'analisi in unità codificate.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	4.546250	0.069241	65.6585	1.268e-15	***
x1	0.276000	0.087583	3.1513	0.009221	**
x2	0.366000	0.087583	4.1789	0.001539	**
x3	-0.089000	0.087583	-1.0162	0.331377	
x2:x3	0.187500	0.097921	1.9148	0.081871	.

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	4,5463	0,0693	65,57	0,000	
pressione	0,2760	0,0877	3,15	0,008	1,00
velocità	0,3660	0,0877	4,17	0,001	1,00
velocità*portata	0,1875	0,0981	1,91	0,080	1,00

Figura 50 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab in unità codificate

Si nota comunque una corrispondenza perfetta tra i due output

3.2.4 Risultati *Vdwtwo* e *Mltwo*

3.2.4.1 *Vdwtwo*

Si ricorda che la funzione “**rsm()**” su *Rstudio* necessita della sotto-funzione “**FO ()**”. In questo caso però nessun termine di primo ordine risulta rilevante. L’intera voce “**FO**” va dunque integrata all’interno della voce “residuals”.

```

Response: vdw
Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FO(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo) 3 28.063 9.354 0.9478 0.457667
I(speedtwo * colantflowtwo) 1 40.703 40.703 4.1239 0.072847
I(pressuretwo^2) 1 2.938 2.938 0.2977 0.598593
I(colantflowtwo^2) 1 155.826 155.826 15.7880 0.003238
Residuals 9 88.829 9.870
Lack of fit 8 66.983 8.373 0.3833 0.855088
Pure error 1 21.846 21.846
    
```

Figura 51 output "Rstudio"

In questo caso andiamo a integrare la voce “**FO**” anche all’interno della voce “Lack of fit”

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
I(speedtwo*colantflowtwo)	1	40,703	40,703	4,1239	0,072847
pressuretwo^2	1	2,938	2,938	0,2977	0,598593
colantflowtwo^2	1	155,826	155,826	15,788	0,003283
Residuals	12	116,892	9,741		
Lack of fit	11	95,046	8,640545	0,3833	0,855088
Pure error	1	21,846	21,846		

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	199,47	66,489	6,83	0,006
Square	2	158,76	79,382	8,15	0,006
pressione*pressione	1	53,90	53,897	5,53	0,037
portata*portata	1	155,83	155,826	16,00	0,002
2-Way Interaction	1	40,70	40,703	4,18	0,064
velocità*portata	1	40,70	40,703	4,18	0,064
Error	12	116,89	9,741		
Lack-of-Fit	11	95,05	8,641	0,40	0,860
Pure Error	1	21,85	21,846		
Total	15	316,36			

Figura 52 confronto output Rstudio e Minitab Vdw

In questo caso si nota come si abbia una corrispondenza praticamente perfetta tra le totalità delle voci presenti, eccezion fatta per la voce relativa al termine della pressione di secondo ordine.

Per comprendere il peso di tali differenze si procede con l'individuare i coefficienti dell'equazione di regressione.

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	79,49	1,41	56,31	0,000	
pressione*pressione	-4,29	1,82	-2,35	0,037	1,28
portata*portata	7,29	1,82	4,00	0,002	1,28
velocità*portata	2,26	1,10	2,04	0,064	1,00

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	79.48716	1.42086	55.9430	9.377e-13	***
x1	-1.46950	0.99347	-1.4792	0.173226	
x2	-0.55250	0.99347	-0.5561	0.591678	
x3	0.58450	0.99347	0.5883	0.570772	
I(x2 * x3)	2.25562	1.11074	2.0307	0.072847	.
I(x1^2)	-4.28648	1.83432	-2.3368	0.044250	*
I(x3^2)	7.28852	1.83432	3.9734	0.003238	**

Figura 53 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab in unità codificate

Si nota comunque una corrispondenza perfetta tra i due output

3.2.4.2 Mltwo

Il procedimento seguito per confrontare gli output tra i due software è lo stesso di quello sfruttato per la risposta *Vdwtwo*.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Pressuretwo^2	1	32,949	32,949	6,2001	0,03442
Colantflowtwo^2	1	32,485	32,485	6,1129	0,03543
pressuretwo:speedtwo	1	27,584	27,584	5,1906	0,0487
Residuals	12	49,271	4,105917		
Lack of fit	11	42,126	3,829636	/	/
Pure error	1	7,144	7,144		

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	93,018	31,006	7,55	0,004
Square	2	65,434	32,717	7,97	0,006
pressione*pressione	1	59,854	59,854	14,58	0,002
portata*portata	1	32,485	32,485	7,91	0,016
2-Way Interaction	1	27,584	27,584	6,72	0,024
pressione*velocità	1	27,584	27,584	6,72	0,024
Error	12	49,271	4,106		
Lack-of-Fit	11	42,127	3,830	0,54	0,801
Pure Error	1	7,144	7,144		
Total	15	142,289			

Figura 54 confronto output Rstudio e Minitab Mltwo

Si nota nuovamente una corrispondenza quasi perfetta tra gli output dei due software ad eccezione del termine di secondo grado relativo alla pressione.

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	83,532	0,916	91,15	0,000	
pressione*pressione	-4,52	1,18	-3,82	0,002	1,28
portata*portata	3,33	1,18	2,81	0,016	1,28
pressione*velocità	-1,857	0,716	-2,59	0,024	1,00

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	83.53239	1.04259	80.1201	3.721e-14 ***
x1	0.37250	0.72898	0.5110	0.621660
x2	-0.01250	0.72898	-0.0171	0.986693
x3	0.07350	0.72898	0.1008	0.921900
I(x1 * x2)	-1.85688	0.81503	-2.2783	0.048698 *
I(x1^2)	-4.51716	1.34598	-3.3560	0.008442 **
I(x3^2)	3.32784	1.34598	2.4724	0.035428 *

Figura 55 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab in unità codificate

Si nota anche in questo caso una corrispondenza perfetta tra i due output.

3.3 SECONDA PARTE ANALISI ALTERNATIVA

Per comprendere le differenze riscontrate tra gli output dei due software si è pensato di condurre l'analisi su “Minitab” in modo tale da evitare la presenza dell'errore precedentemente riportato. Per tale motivo si è deciso di introdurre nelle seguenti analisi tutti i termini di primo ordine. Essendo il procedimento seguito lo stesso elencato nei paragrafi precedenti si procederà direttamente con il confronto tra gli output dei due software sottolineando le eventuali differenze

3.3.1 Confronto Rstudio e Minitab

3.3.1.1 *Cutratedtwo*

Solo nel caso della risposta relativa al *Cutrated* si è modificata anche la funzione “**rsm ()**” sul software *Rstudio* inserendo il termine *colantflowtwo* all'interno della sotto-funzione “**FO ()**”. Si riportano di seguito gli output ottenuti.

Response: cutrated						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FO(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	2.18053	0.72684	9.4754	0.002202	
speedtwo:colantflowtwo	1	0.28125	0.28125	3.6665	0.081871	
Residuals	11	0.84380	0.07671			
Lack of fit	10	0.83660	0.08366	11.6194	0.224759	
Pure error	1	0.00720	0.00720			

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	4	2,46178	0,61545	8,02	0,003	
Linear	3	2,18053	0,72684	9,48	0,002	
pressione	1	0,76176	0,76176	9,93	0,009	
velocità	1	1,33956	1,33956	17,46	0,002	
portata	1	0,07921	0,07921	1,03	0,331	
2-Way Interaction	1	0,28125	0,28125	3,67	0,082	
velocità*portata	1	0,28125	0,28125	3,67	0,082	
Error	11	0,84379	0,07671			
Lack-of-Fit	10	0,83659	0,08366	11,62	0,225	
Pure Error	1	0,00720	0,00720			
Total	15	3,30558				

Figura 56 confronto Rstudio e Minitab *cutrated*

In questo caso si può notare una corrispondenza perfetta tra i due output. Si vuole inoltre far notare come si sia modificato l'output del software *Rstudio*.

Si procede comunque con l'individuazione dei coefficienti dell'equazione di regressione.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	2.9830833	2.9200145	1.0216	0.328914	
pressuretwo	0.5520000	0.1751669	3.1513	0.009221	**
speedtwo	-0.0643000	0.0739145	-0.8699	0.402926	
colantflowtwo	-0.1868667	0.0921363	-2.0282	0.067464	.
speedtwo:colantflowtwo	0.0050000	0.0026112	1.9148	0.081871	.

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{cutratedmed} = 2,98 + 0,552 \text{ pressione} - 0,0643 \text{ velocità} - 0,1869 \text{ portata} + 0,00500 \text{ velocità*portata}$$

Figura 57 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab Cutrated analisi in unità non codificate

In questo caso si può notare come i coefficienti dell'equazione di regressione individuati da *Rstudio* siano gli stessi individuati nell'analisi precedente.

I coefficienti individuati dal software *Minitab* sono invece differenti rispetto all'analisi precedente e ora coincidono con quelli individuati da "Rstudio".

Si procede anche con l'analisi in unità codificate

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	4.546250	0.069241	65.6585	1.268e-15	***
x1	0.276000	0.087583	3.1513	0.009221	**
x2	0.366000	0.087583	4.1789	0.001539	**
x3	-0.089000	0.087583	-1.0162	0.331377	
x2:x3	0.187500	0.097921	1.9148	0.081871	.

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	4,5463	0,0692	65,66	0,000	
pressione	0,2760	0,0876	3,15	0,009	1,00
velocità	0,3660	0,0876	4,18	0,002	1,00
portata	-0,0890	0,0876	-1,02	0,331	1,00
velocità*portata	0,1875	0,0979	1,91	0,082	1,00

Figura 58 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab in unità codificate

Nuovamente si ottiene una corrispondenza perfetta tra i due output.

3.3.1.2 *Vdwtwo*

Response: vdw

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
F0(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo)	3	28.063	9.354	0.9478	0.457667
I(speedtwo = colantflowtwo)	1	40.703	40.703	4.1239	0.072847
I(pressuretwo^2)	1	2.938	2.938	0.2977	0.598593
I(colantflowtwo^2)	1	155.826	155.826	15.7880	0.003238
Residuals	9	88.829	9.870		
Lack of fit	8	66.983	8.373	0.3833	0.855088
Pure error	1	21.846	21.846		

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	227,530	37,922	3,84	0,035
Linear	3	28,063	9,354	0,95	0,458
pressione	1	21,594	21,594	2,19	0,173
velocità	1	3,053	3,053	0,31	0,592
portata	1	3,416	3,416	0,35	0,571
Square	2	158,764	79,382	8,04	0,010
pressione*pressione	1	53,897	53,897	5,46	0,044
portata*portata	1	155,826	155,826	15,79	0,003
2-Way Interaction	1	40,703	40,703	4,12	0,073
velocità*portata	1	40,703	40,703	4,12	0,073
Error	9	88,829	9,870		
Lack-of-Fit	8	66,983	8,373	0,38	0,855
Pure Error	1	21,846	21,846		
Total	15	316,360			

Figura 59 confronto output Rstudio e Minitab *Vdw*

Si nota come le differenze tra i due output sono rimaste le stesse nonostante l'inclusione dei termini di primo ordine. Si procede dunque con l'individuazione dei coefficienti dell'equazione di regressione.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-705.31888	402.50722	-1.7523	0.113629
pressuretwo	254.24964	110.07733	2.3097	0.046256 *
speedtwo	-1.76463	0.83842	-2.1047	0.064625 .
colantflowtwo	-9.15387	2.07584	-4.4097	0.001696 **
I(speedtwo * colantflowtwo)	0.06015	0.02962	2.0307	0.072847 .
I(pressuretwo^2)	-17.14591	7.33729	-2.3368	0.044250 *
I(colantflowtwo^2)	0.12957	0.03261	3.9734	0.003238 **

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{Vdwmed} = -705 + 254 \text{ pressione} - 1,765 \text{ velocità} - 9,15 \text{ portata} - 17,15 \text{ pressione*pressione} + 0,1296 \text{ portata*portata} + 0,0602 \text{ velocità*portata}$$

Figura 60 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab Vdw analisi in unità non codificate

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	79.48716	1.42086	55.9430	9.377e-13 ***
x1	-1.46950	0.99347	-1.4792	0.173226
x2	-0.55250	0.99347	-0.5561	0.591678
x3	0.58450	0.99347	0.5883	0.570772
I(x2 * x3)	2.25562	1.11074	2.0307	0.072847 .
I(x1^2)	-4.28648	1.83432	-2.3368	0.044250 *
I(x3^2)	7.28852	1.83432	3.9734	0.003238 **

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	79,49	1,42	55,94	0,000	
pressione	-1,469	0,993	-1,48	0,173	1,00
velocità	-0,553	0,993	-0,56	0,592	1,00
portata	0,584	0,993	0,59	0,571	1,00
pressione*pressione	-4,29	1,83	-2,34	0,044	1,28
portata*portata	7,29	1,83	3,97	0,003	1,28
velocità*portata	2,26	1,11	2,03	0,073	1,00

Figura 61 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab in unità codificate

Anche in questo caso si nota una corrispondenza perfetta tra le equazioni di regressione individuate.

3.3.1.3 Mltwo

```

Response: m1
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FO(pressuretwo, speedtwo, colantflowtwo) 3  1.443   0.481   0.0905 0.96343
I(pressuretwo^2)                          1 32.949  32.949   6.2001 0.03442
I(colantflowtwo^2)                         1 32.485  32.485   6.1129 0.03543
pressuretwo:speedtwo                       1 27.584  27.584   5.1906 0.04870
Residuals                                   9 47.828   5.314
Lack of fit                                 8 40.683   5.085   0.7118 0.73007
Pure error                                   1  7.144   7.144
  
```

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	94,461	15,7435	2,96	0,070
Linear	3	1,443	0,4810	0,09	0,963
pressione	1	1,388	1,3876	0,26	0,622
velocità	1	0,002	0,0016	0,00	0,987
portata	1	0,054	0,0540	0,01	0,922
Square	2	65,434	32,7169	6,16	0,021
pressione*pressione	1	59,854	59,8539	11,26	0,008
portata*portata	1	32,485	32,4853	6,11	0,035
2-Way Interaction	1	27,584	27,5839	5,19	0,049
pressione*velocità	1	27,584	27,5839	5,19	0,049
Error	9	47,828	5,3142		
Lack-of-Fit	8	40,683	5,0854	0,71	0,730
Pure Error	1	7,144	7,1442		
Total	15	142,289			

Figura 62 confronto output Rstudio e Minitab M1

Si nota come le differenze tra i due output sono rimaste le stesse nonostante l'inclusione dei termini di primo ordine. Si procede dunque con l'individuazione dei coefficienti dell'equazione di regressione.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-1.0888e+03	3.0678e+02	-3.5492	0.006224	**
pressuretvo	2.9777e+02	8.1574e+01	3.6503	0.005315	**
speedtvo	5.5681e+00	2.4494e+00	2.2732	0.049103	*
colantflowtvo	-3.2441e+00	1.3196e+00	-2.4583	0.036260	*
I(pressuretvo^2)	-1.8069e+01	5.3839e+00	-3.3560	0.008442	**
I(colantflowtvo^2)	5.9162e-02	2.3928e-02	2.4724	0.035428	*
pressuretvo:speedtvo	-7.4275e-01	3.2601e-01	-2.2783	0.048698	*

Regression Equation in Uncoded Units

$$M1med = -1089 + 297,8 \text{ pressione} + 5,57 \text{ velocità} - 3,24 \text{ portata} - 18,07 \text{ pressione*pressione} + 0,0592 \text{ portata*portata} - 0,743 \text{ pressione*velocità}$$

Figura 64 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab M1, analisi in unità non codificate

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	83.53239	1.04259	80.1201	3.721e-14	***
x1	0.37250	0.72898	0.5110	0.621660	
x2	-0.01250	0.72898	-0.0171	0.986693	
x3	0.07350	0.72898	0.1008	0.921900	
I(x1 * x2)	-1.85688	0.81503	-2.2783	0.048698	*
I(x1^2)	-4.51716	1.34598	-3.3560	0.008442	**
I(x3^2)	3.32784	1.34598	2.4724	0.035428	*

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	83,53	1,04	80,12	0,000	
pressione	0,372	0,729	0,51	0,622	1,00
velocità	-0,012	0,729	-0,02	0,987	1,00
portata	0,074	0,729	0,10	0,922	1,00
pressione*pressione	-4,52	1,35	-3,36	0,008	1,28
portata*portata	3,33	1,35	2,47	0,035	1,28
pressione*velocità	-1,857	0,815	-2,28	0,049	1,00

Figura 63 confronto coefficienti equazione di regressione Rstudio e Minitab in unità codificate

Anche in questo caso si nota una corrispondenza perfetta tra le due equazioni trovate.

3.4 COCLUSIONI RELATIVE AI PRIMI DUE STEP DELL'ANALISI

Concentrandosi sulla “prima parte dell’analisi” e sulla “seconda parte dell’analisi alternativa” si può dedurre che l’utilizzo del software “Minitab” oppure del software “Rstudio” risulta quasi indifferente. L’unica eccezione relativa all’utilizzo di un software o dell’altro riguarda il trattamento dei termini di secondo ordine. Le uniche differenze riscontrate riguardano infatti i termini “pressuretwo^2” e “speedtwo^2”. Le differenze non riguardano però il termine “colantflowtwo2”.

Si vuole però far notare che la somma dei “Sum Sq” dei termini di secondo ordine ad un grado di libertà (pressuretwo:speedtwo, pressuretwo:colantflowtwo, speedtwo:colantflowtwo) è pari al “Sum Sq” della voce TWI in “Rstudio” o 2 way-interaction in “Minitab”.

Analogamente la somma degli F-value divisa per il numero di gradi di libertà (3 GDL) relativi agli stessi termini sono pari al F-value delle due voci prima descritte. Si riportano come esempio i dati estrapolati dalla prima parte dell’analisi relativa al cutrated.

$$Sum Sq_{TWI/2wayinteraction} = Sum Sq_{pressuretwo} + Sum Sq_{speedtwo} + Sum sq_{colantflowtwo}$$

$$F - value_{TWI/2wayinteraction} = \frac{F-value_{pressuretwo} + F-value_{speedtwo} + F-value_{colantflowtwo}}{DF_{way-interaction}}$$

Sum Sq					
Software	Pressure:speed	pressure:colantflow	Speed:colantflow	Somma	TWI /2way-interaction
Rstudio	3,843	3,258	40,703	47,804	47,804
Minitab	3,843	3,258	40,703	47,804	47,804

F-Value					
Software	Pressure:speed	pressure:colantflow	Speed:colantflow	somma	TWI /2way-interaction
Rstudio	0,4132	0,3503	4,3763	1,7133	1.7133
Minitab	0,41	0,35	4,38	1,71	1,71

A seguito di analisi precedenti relative alla definizione di modelli del 1° ordine è possibile confermare che tale ragionamento vale anche per i termini di primo grado (pressuretwo,speedtwo e colantflowtwo) e le relative voci ovvero FO in “Rstudio” e linear in “Minitab”

Ciò non risulta vero però per i termini di secondo grado relativi ai quadrati puri (pressuretwo^2, speedtwo^2 e colantflowtwo^2) forniti esclusivamente dal software “Minitab”.

Sum Sq					
Software	Pressure^2	Speed^2	Colantflow^2	Somma	PQ /Square
Rstudio	2,938	77,419	104,331	184,688	184,688
Minitab	73,615	25,924	104,331	203,87	184,688

F-Value					
Software	Pressure^2	Speed^2	Colantflow^2	Somma	PQ /Square
Rstudio	0,3159	8,3239	11,2175	6,6191	6,6191
Minitab	7,91	2,79	11,22	7,31	6,62

Ciò è sintomo di un diverso approccio seguito dai due software per il trattamento di tali termini e di una possibile imprecisione commessa dal software “Minitab”.

Nella seconda parte dell’analisi, basandosi sul fatto che il software Minitab stesso riporti un possibile errore e sul fatto che il software “Rstudio” non permetta l’assenza dei termini di primo ordine si considera più veritiera l’analisi eseguita dal secondo software (“Rstudio”) oppure la seconda parte dell’analisi alternativa.

3.5 TERZA PARTE DELL'ANALISI

Basandosi sulle conclusioni ottenute nel paragrafo precedente è stato deciso di realizzare il proseguo dell'analisi considerando come seconda parte dell'analisi la versione alternativa. Il proseguo delle trattazioni verterà dunque sulla realizzazione della terza parte dell'analisi dapprima sul software "Minitab" e in seguito sul software "Rstudio". I risultati ottenuti su "Minitab" saranno confrontati con quelli ottenuti sul medesimo software nel lavoro di tesi precedente. Tale confronto non avrà però l'obiettivo di verificare l'uguaglianza dei due output, ma bensì quello di osservare il cambiamento degli output a seguito dell'introduzione della totalità dei fattori al primo ordine.

Una volta presentati gli output forniti da "Minitab" e da "Rstudio" si procederà con il confronto tra tali output.

Prima di procedere è opportuno chiarire che la terza parte dell'analisi è volta alla verifica del modello trovato sfruttando una serie di analisi grafiche. È opportuno dunque chiarire che alcune analisi grafiche saranno condotte in modo differente dai due software ma andranno a verificare il medesimo aspetto.

3.5.1 Grafico di Pareto

I coefficienti che moltiplicano i fattori sono proporzionali al peso che il rispettivo fattore ha all'interno del modello. È possibile osservare questo aspetto anche mediante il grafico di Pareto. In tale grafico i fattori sono riportati in ordine di significatività. La variabile in ordinata, ovvero il "tvalue" riportato nelle tabelle precedenti, è continua, mentre la variabile in ascissa, ovvero i fattori, è discreta.

3.5.1.1 Analisi su "Minitab"

La realizzazione di tale grafico su "Minitab" è estremamente semplice. Questo viene infatti realizzato di default dal software. Si riporta dunque il grafico ottenuto dall'analisi corrente (indicato dalla dicitura "NEW") e il grafico ottenuto dall'analisi relativa al lavoro di tesi precedente (indicato dalla dicitura "OLD").

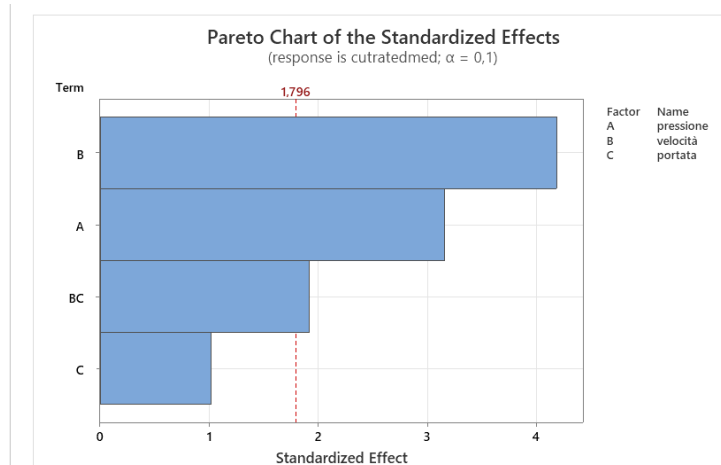


Figura 65 Grafico di Pareto "Minitab" "NEW"

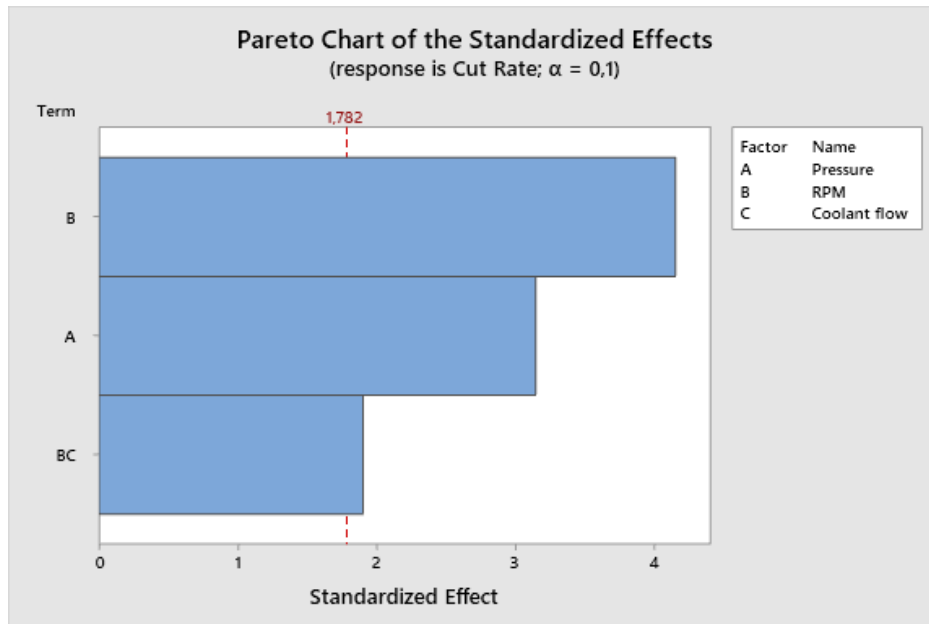


Figura 66 Grafico di Pareto "Minitab" "OLD"

Si può notare come i due grafici risultino estremamente simili. Nel grafico ottenuto mediante l'analisi corrente si nota però la presenza del termine relativo alla portata. Tale termine si trova comunque nell'ultima posizione e dunque risulta come il meno significativo dei fattori facenti parte il modello.

3.5.1.2 Analisi su "Rstudio"

Per realizzare il "grafico di pareto" sul software "Rstudio" occorre andare ad estrarre la tabella relativa ai coefficienti del modello individuata attraverso la funzione "rsm()" e inserirla all'interno di un dataframe. Per far ciò si sfrutta la funzione "as.dataframe()". Da tale file viene poi estratta la colonna relativa ai "tvalue". Tale colonna viene inserita all'interno del vettore "tvalue_CUTRATE". Gli elementi necessari alla realizzazione del grafico corrispondono ai moduli degli elementi di tale vettore, eccezion fatta per il primo valore, il quale corrisponde al tvalue del termine noto dell'equazione di regressione. Tali elementi sono dunque inseriti all'interno del vettore "tvalue_CUTRATE.pareto", il quale è inserito all'interno della funzione "pareto.chart()", la quale andrà a realizzare il grafico.

```

139
140 #CUTRATE
141 coefficients_CUTRATE=as.data.frame(summary_ANOVAcutrated2$coefficients)
142 tvalue_CUTRATE=coefficients_CUTRATE$t value
143 tvalue_CUTRATE.pareto=abs(tvalue_CUTRATE[c(-1)])
144 pareto.chart(tvalue_CUTRATE.pareto)
145

```

Figura 67 funzioni necessarie a realizzare il grafico di pareto

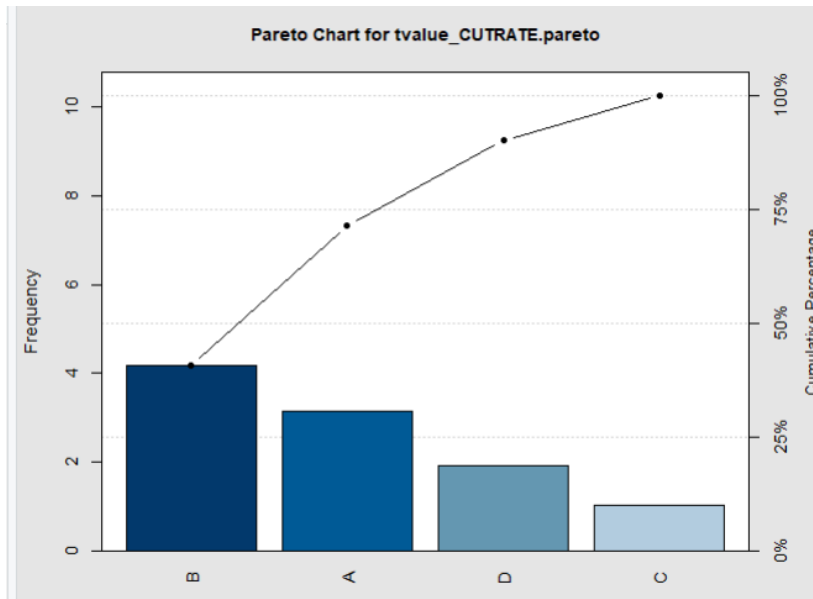


Figura 68 grafico di pareto "Rstudio"

Si nota dunque una corrispondenza perfetta tra i grafici ottenuti attraverso i due software.

3.5.1.3 Risultati Vdwtwo

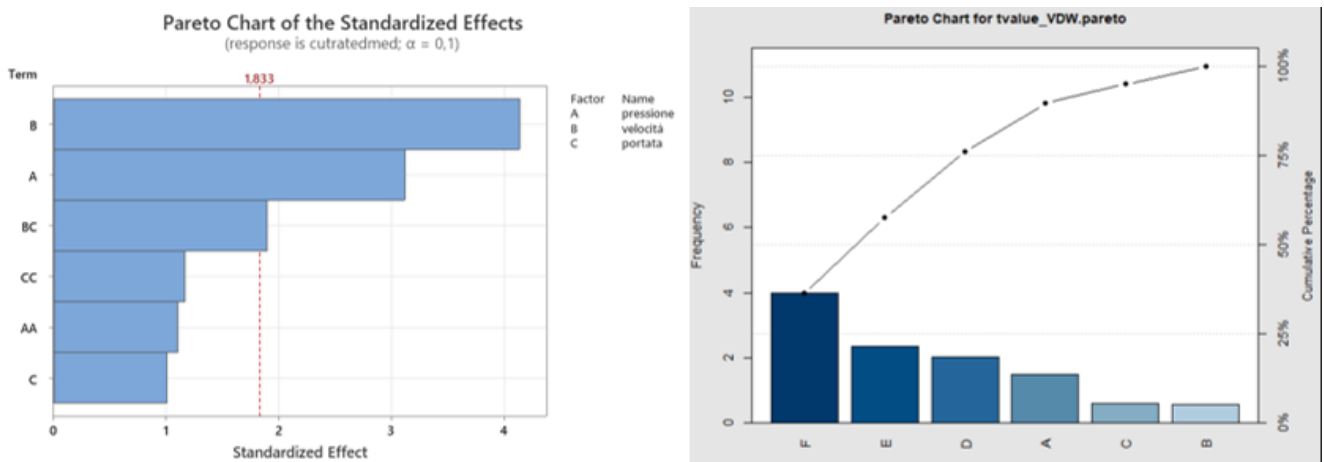


Figura 69 Grafico di pareto "Minitab" (sinistra) e "Rstudio" (destra)

Si nota anche in questo caso una corrispondenza perfetta tra i grafici ottenuti attraverso i due software.

3.5.1.4 Risultati Mltwo

Si nota anche in questo caso una corrispondenza perfetta tra i grafici ottenuti attraverso i due

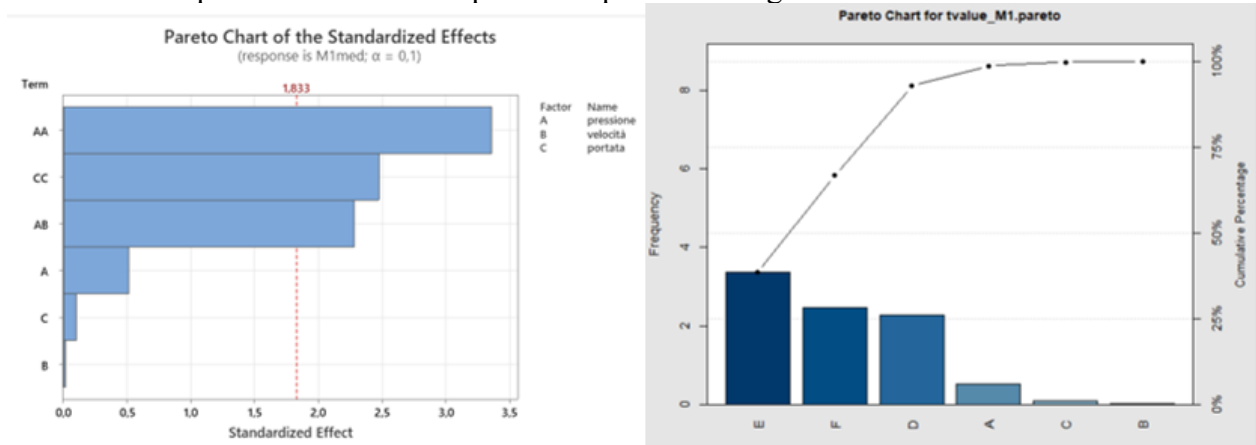


Figura 70 Grafico di pareto "Minitab" (sinistra) e "Rstudio" (destra)

software.

3.5.2 Grafico di probabilità normale dei residui

Tale grafico, come anche i successivi grafici sui residui, viene utilizzato per capire se il modello risulta adeguato e i risultati siano sensati. Questo grafico in particolare è utilizzato per verificare l'assunzione che i residui siano distribuiti normalmente. In questo caso si otterrebbe una situazione in cui dei punti siano distribuiti il più possibile in prossimità di una retta.

3.5.2.1 Analisi su "Minitab"

La realizzazione di tale grafico su "Minitab" è estremamente semplice. Questo viene infatti realizzato di default dal software. Si riporta dunque il grafico ottenuto dall'analisi corrente (indicato dalla dicitura "NEW") e il grafico ottenuto dall'analisi relativa al lavoro di tesi precedente (indicato dalla dicitura "OLD").

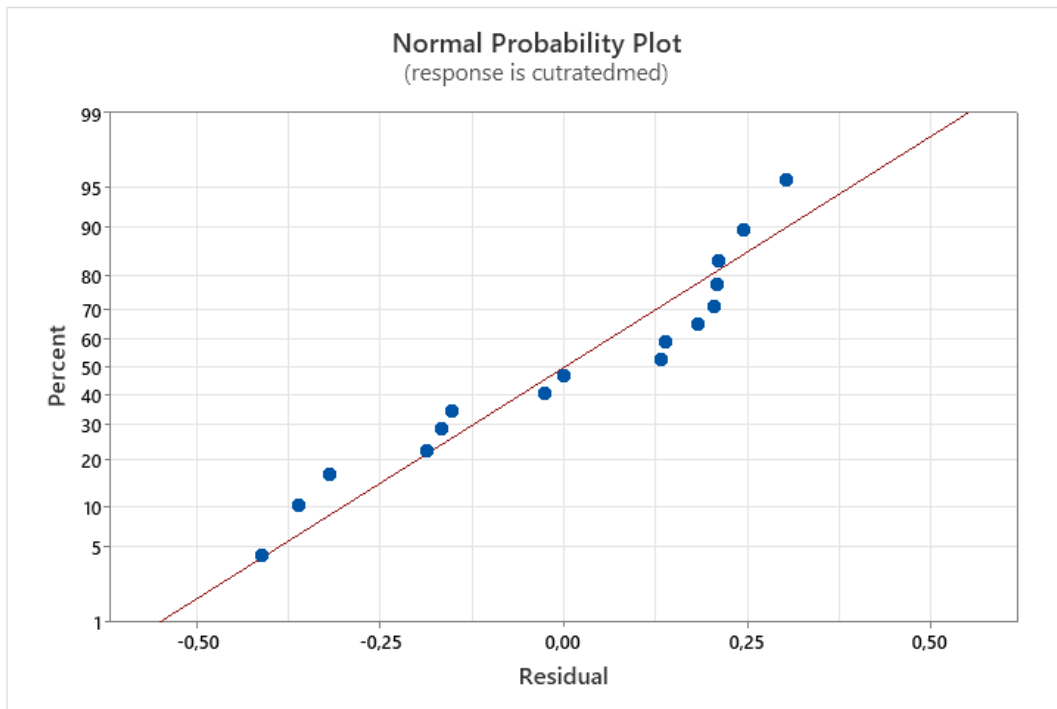


Figura 72 Grafico di probabilità normale dei residui "Minitab" "NEW"

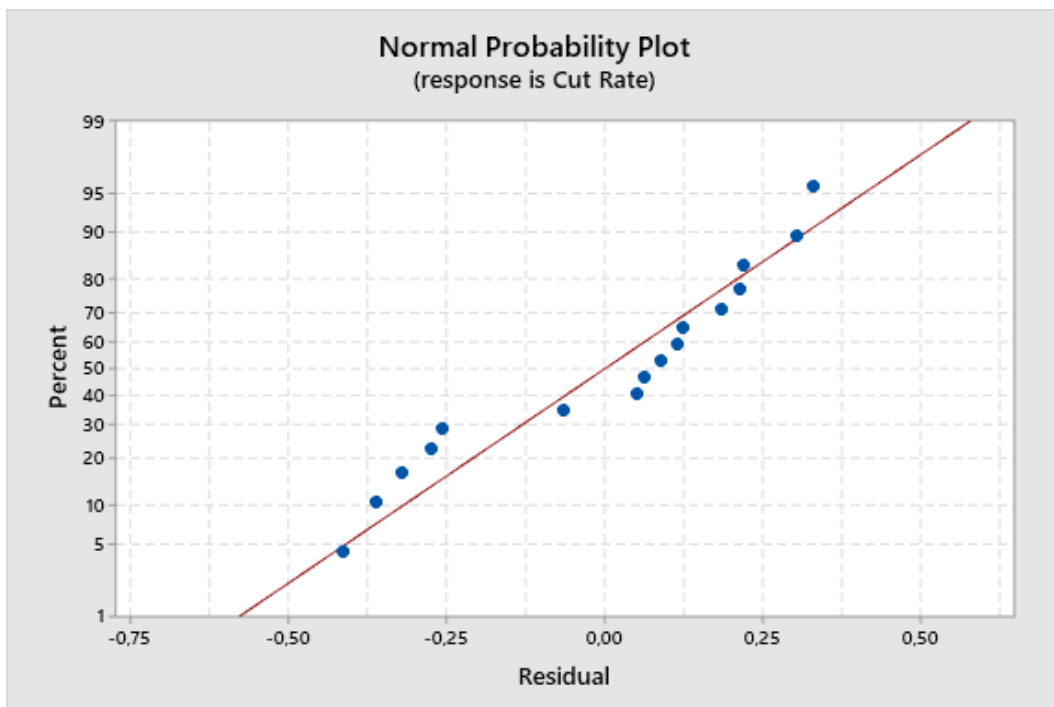


Figura 71 Grafico di probabilità normale dei residui "Minitab" "OLD"

Il software "Minitab" effettua tale verifica mediante un grafico in cui si riporta la percentuale dei residui.

Si può notare come i due set di punti si distribuiscono in maniera leggermente differente nei due grafici riportati. Indipendentemente da ciò, in entrambi i casi, i due set di punti si distribuiscono in prossimità della retta confermando l'adeguatezza del modello.

3.6.2.2 *Analisi su "Rstudio"*

Per semplificare la realizzazione di tale grafico sul software "Rstudio" è opportuno salvare i residui ottenuti attraverso l' "ANOVA" all'interno di un vettore, indicato come "residui_cutrate".

Tale vettore è dunque inserito all'interno della funzione "qqnorm()", la quale va a realizzare il set di punti. Per realizzare la retta attorno alla quale si vuole che si distribuiscono i vari punti, il vettore "residui_cutrate" viene inserito anche all'interno della funzione "qqline()".

```
154  
155 ##### GRAFICO PROBABILITA NORMALE DEI RESIDUI  
156  
157 #CUTRATE  
158  
159 qqnorm(residui_cutrate)  
160 qqline(residui_cutrate)  
161
```

Figura 73 funzioni "qqnorm()" e "qqline()"

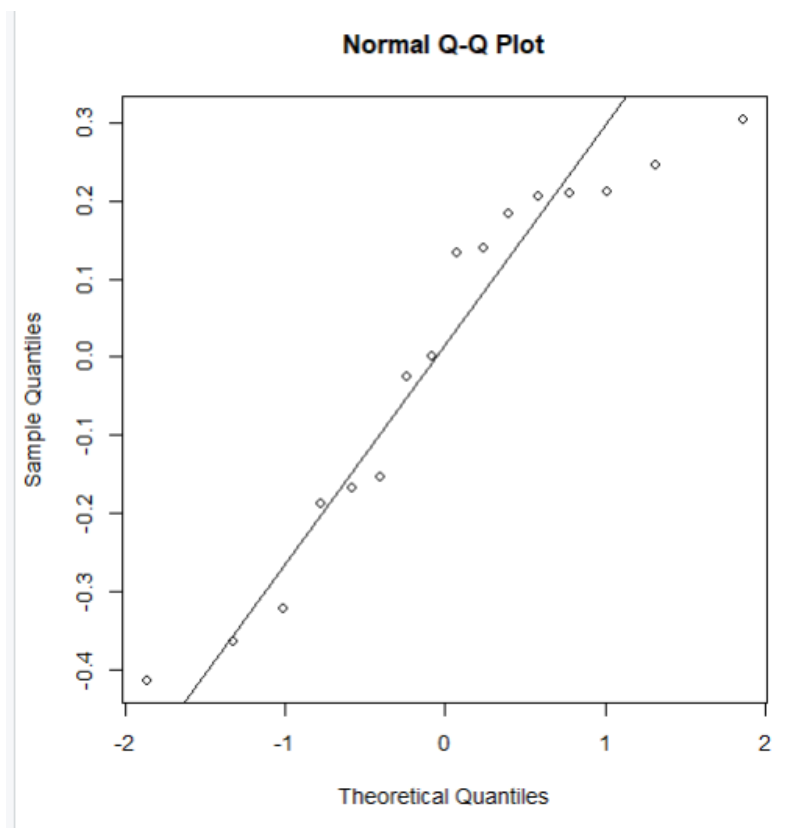


Figura 74 Grafico di probabilità normale dei residui "Rstudio"

Si può notare come il software “Rstudio” effettua la verifica sull’adeguatezza del modello realizzando un grafico “quantili-quantili”, ovvero mette a confronto i quantili di una variabile con quelli della distribuzione normale di una variabile teorica con la stessa media e la stessa deviazione standard. Si ricorda che, in probabilità, un quantile di ordine α è un valore q_α nel quale la somma delle probabilità discrete sia maggiore o uguale ad α . Nonostante l’analisi sia condotta in modo differente rispetto a “Minitab” l’adeguatezza del modello viene verificata allo stesso modo ovvero verificando che il set di punti si distribuisca il più vicino possibile alla retta. Anche in questo caso si nota che il modello risulta adeguato.

3.5.2.3 Risultati Vdwtwo

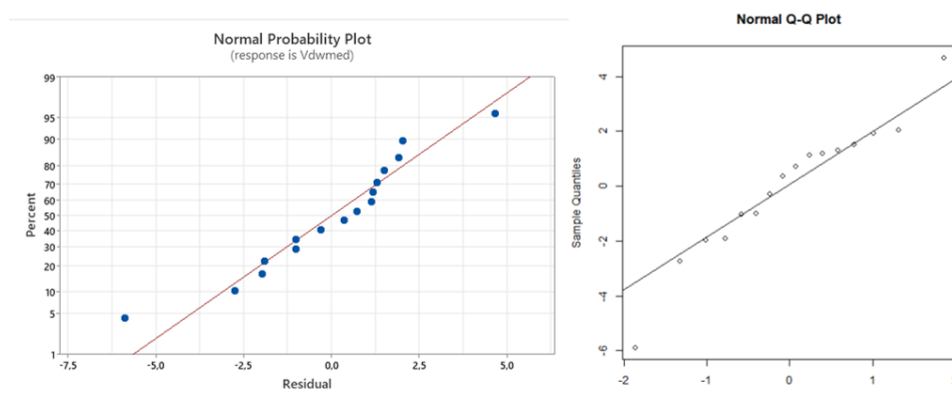


Figura 75 Grafico di probabilità normale dei residui "Minitab" (sinistra) e "Rstudio" (destra)

Anche in questo caso si nota che il modello risulta adeguato.

3.5.2.3 Risultati M1two

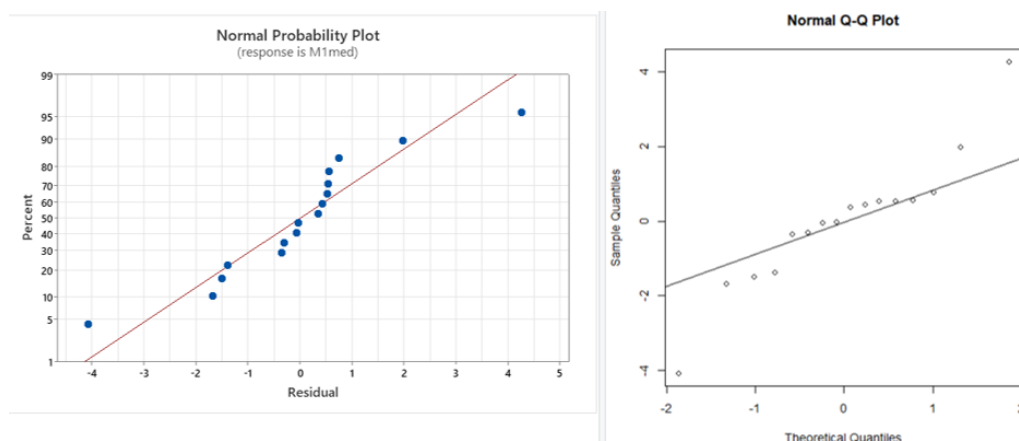


Figura 76 Grafico di probabilità normale dei residui "Minitab" (sinistra) e "Rstudio" (destra)

Anche in questo caso si nota che il modello risulta adeguato.

3.5.3 Grafico “Residuals versus Fit”

Tale grafico viene utilizzato per verificare l’ipotesi che i residui siano distribuiti casualmente e che abbiano una varianza costante. In questo caso si ottiene una situazione in cui si hanno dei punti distribuiti in modo casuale al di sopra e al di sotto dello 0 senza mostrare particolari tendenze come curvature o andamenti rettilinei.

3.5.3.1 Analisi su “Minitab”

La realizzazione di tale grafico su “Minitab” è estremamente semplice. Questo viene infatti realizzato di default dal software.

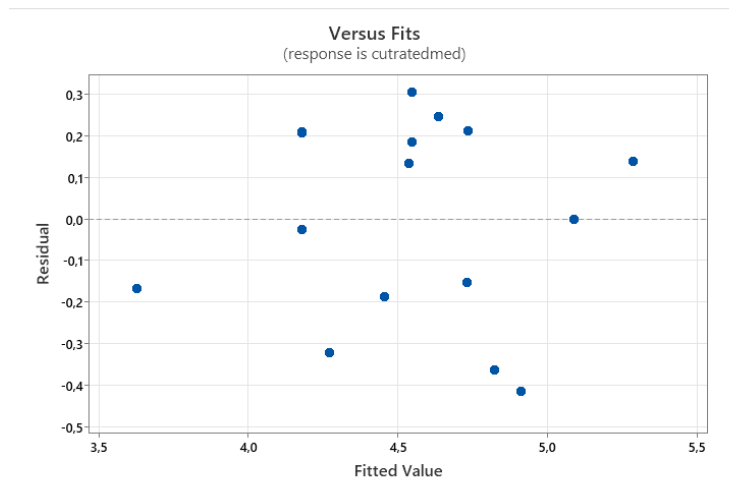


Figura 78 Grafico "Residuals versus fit" "Minitab" "NEW"

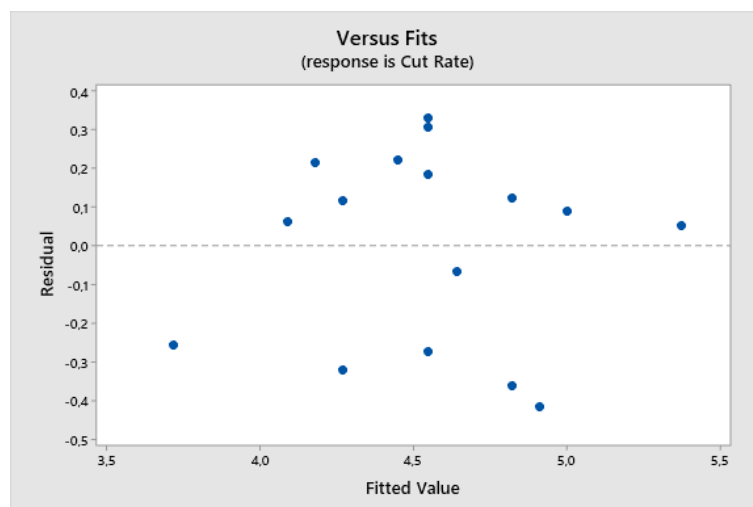


Figura 77 Grafico "Residuals versus fit" "Minitab" "OLD"

Si può notare come i due set di punti si distribuiscono in maniera leggermente differente nei due grafici riportati. Indipendentemente da ciò, in entrambi i casi, i due set di punti si distribuiscono in modo casuale al di sotto e al di sopra dello “0”, confermando l’adeguatezza del modello.

3.5.3.2 *Analisi su “Rstudio”*

Per realizzare tale grafico su “Rstudio” viene realizzato il vettore di valori fittati sfruttando la funzione “fitted()”. All’interno di tale funzione viene inserito il risultato ottenuto attraverso la funzione “rsm()”. Si ottiene così il vettore “yfit”. Tale vettore contiene le ordinate del grafico che si vuole realizzare. Le ascisse sono invece contenute nel vettore “residui_cutrate”. Attraverso la funzione “plot()” viene dunque realizzato il grafico in questione. Per demarcare lo “0” viene inserita una retta orizzontale a tale ordinata mediante la funzione “abline(h=0)”.

```
172 ##### GRAFICO RESIDUAL VERSUS FIT
173
174 #CUTRATE
175 yfit=fitted(ANOVAcutrated2)
176 plot(yfit,residui_cutrate,ylab="RESIDUI",xlab="FITTED",main="RESIDUI VS FITTED")
177 abline(h=0)
```

Figura 80 funzioni "fitted()" e "plot()"

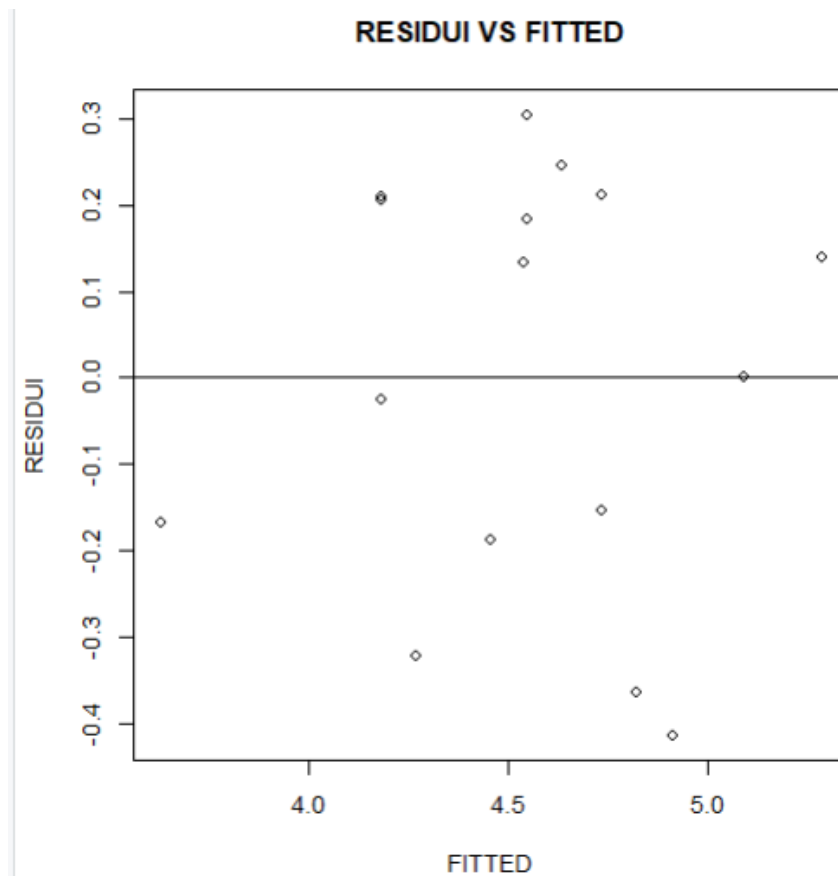


Figura 79 Grafico " residui vs fitted" “Rstudio”

La verifica realizzata attraverso tale grafico viene dunque realizzata allo stesso modo sia in “Rstudio”, sia in “Minitab”. Anche in Rstudio, dunque si conferma l’adeguatezza del modello

3.5.3.3 Risultati Vdwtwo

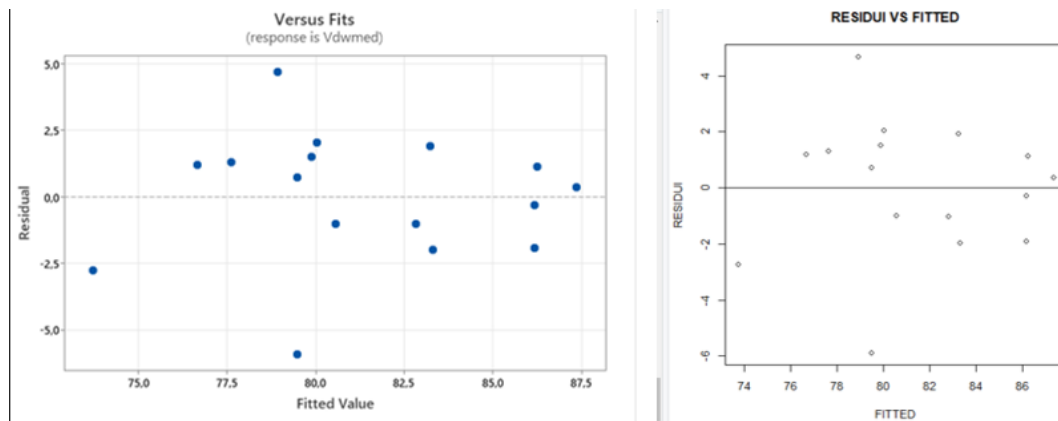


Figura 81 Grafico "residui vs fitted" "Minitab" (sinistra) e "Rstudio" (destra)

Anche in questo caso si nota che il modello risulta adeguato.

3.5.3.4 Risultati M1two

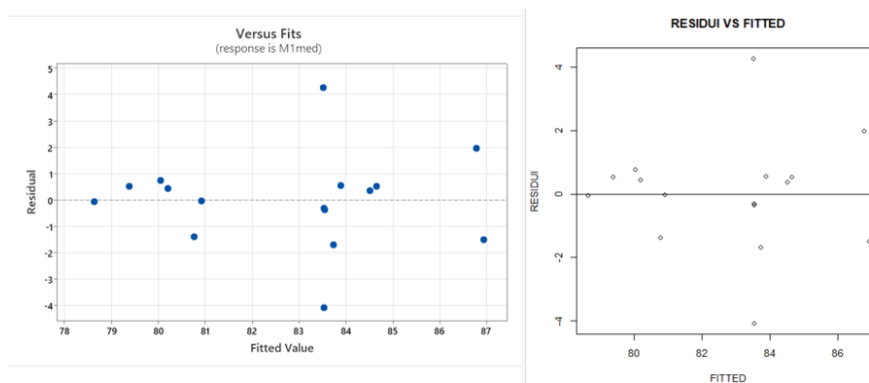


Figura 82 Grafico "residui vs fitted" "Minitab" (sinistra) e "Rstudio" (destra)

Anche in questo caso si nota che il modello risulta adeguato.

3.6.4 Risposta media di ogni fattore significativo sulla risposta in esame

Tali grafici permettono di osservare come varia la risposta media in esame in funzione di un singolo fattore e riconoscere anche graficamente il fattore più significativo per la risposta.

Attraverso il grafico di interazione si può identificare come l'interazione tra due fattori influenza la risposta media. In generale se vi è una condizione di parallelismo tra le curve del grafico allora l'interazione tra i fattori è poco se non per nulla significativa; quando invece le curve assumono pendenze diverse o addirittura si intersecano tra loro allora l'interazione tra i fattori è molto forte.

3.5.5.1 Analisi su "Minitab"

Sul software "Minitab" tali grafici sono realizzati mediante l'apposita funzione. Si riporta nuovamente il confronto tra i grafici ottenuti nella nuova e nella vecchia analisi.

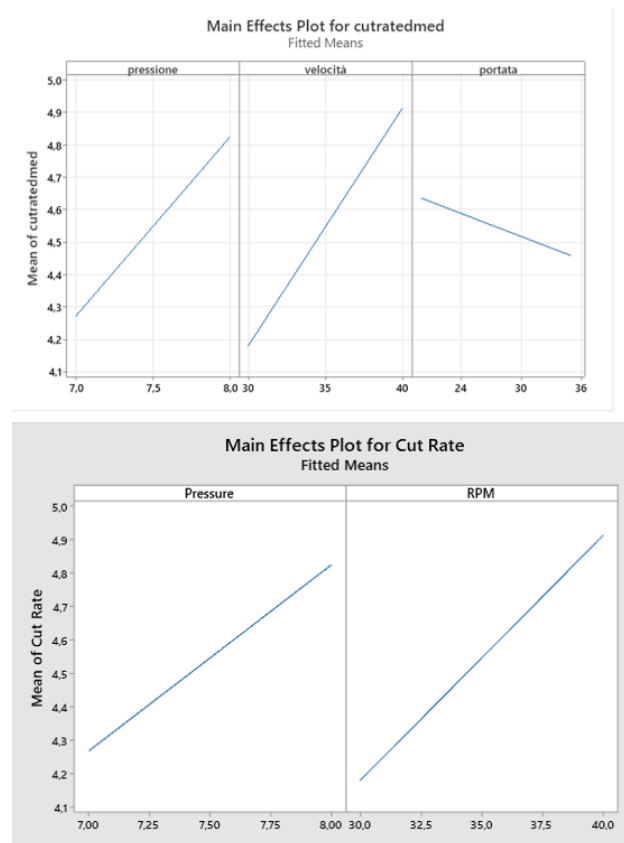


Figura 83 grafici risposta media "Minitab" "NEW" (Sopra) e "OLD" (Sotto)

È possibile individuare una corrispondenza perfetta tra gli output delle due analisi. Nell'analisi precedente non è però stata riportata la risposta media in funzione della portata. Tale scelta è da imputare al fatto che la portata non compare come fattore significativo nell'analisi precedente.

Mediante la stessa funzione "Minitab" fornisce anche i grafici di interazione.

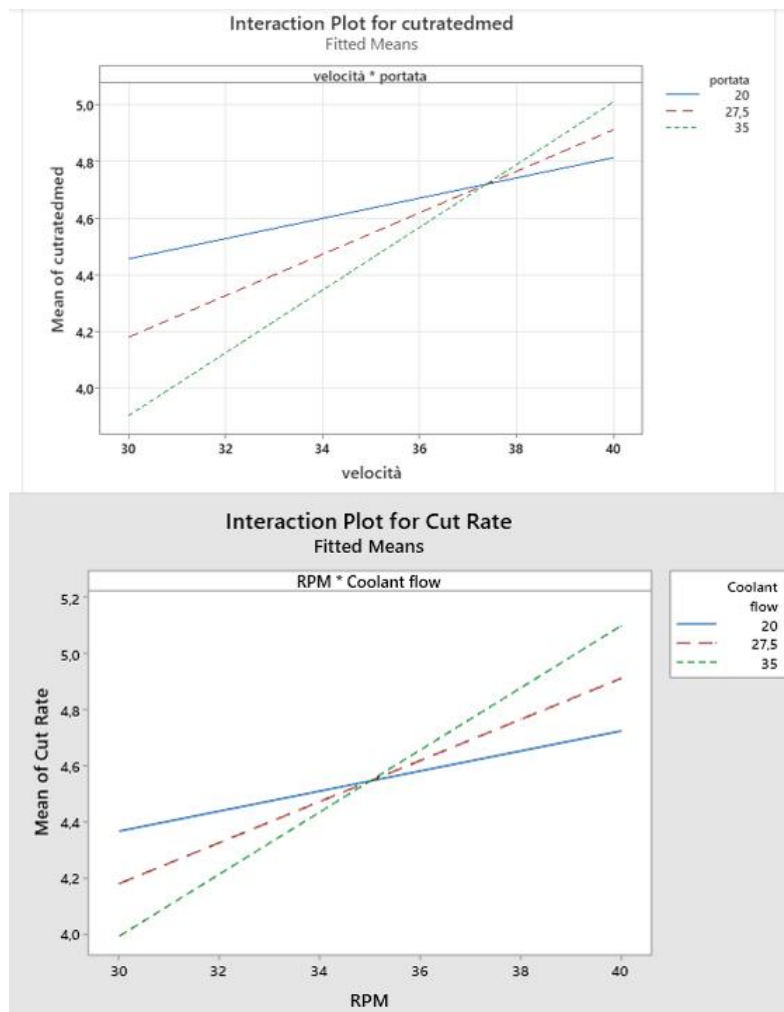


Figura 84 grafico interazione tra i fattori "Minitab" "NEW" (Sopra) e "OLD" (Sotto)

Anche in questo caso si nota una corrispondenza perfetta. Unica eccezione è l'ascissa e l'ordinata" del punto di intersezione delle tre curve.

3.5.5.2 Analisi su “Rstudio”

Per realizzare i grafici della risposta media su rstudio si sfrutta la funzione “plotmeans()”. In tale funzione vengono inseriti i valori “fittati” ottenuti attraverso la funzione “rsm()”. Oltre a tali valori si inserisce il fattore in esame.

```
204
205 #CUTRATE
206
207 plotmeans(fitted(ANOVAcutrated2)~pressuretwo,data=df)
208 abline(h=4.3)
209 abline(h=4.8)
210 plotmeans(fitted(ANOVAcutrated2)~speedtwo,fun=mean,data=df)
211 abline(h=4.2)
212 abline(h=4.9)
213 plotmeans(fitted(ANOVAcutrated2)~colantflowtwo,fun=mean,data=df)
214
```

Figura 85 funzione "plotmeans()" per i fattori di pressione, velocità e portata

Si riportano i grafici ottenuti attraverso tali funzioni.

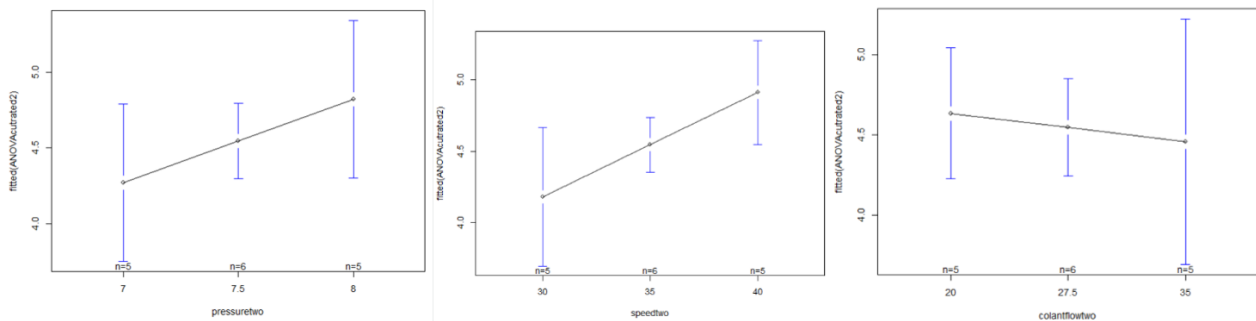


Figura 86 grafici risposta media "Rstudio"

Confrontando tali grafici con quelli ottenuti su “Minitab” si nota una corrispondenza perfetta.

Per ottenere il grafico relativo all’interazione tra i fattori si sfrutta la funzione “interaction.plot()”. Tale funzione richiede tre tipologie di input:

- x.factor ovvero il fattore che si troverà sull’asse delle x
- trace.factor
- response ovvero la risposta in esame. Anche in questo caso si inseriranno i valori fittati ottenuti attraverso la funzione “rsm()”.

```

214
215 interaction.plot(x.factor = df$speedtwo,
216                 trace.factor = df$colantflowtwo,
217                 response = fitted(ANOVAcutrated2),
218                 fun=mean,
219                 xlab="speed",
220                 ylab="mean of cutrated",
221                 trace.label="colantflowtwo")
222

```

Figura 87 funzione "interaction.plot()"

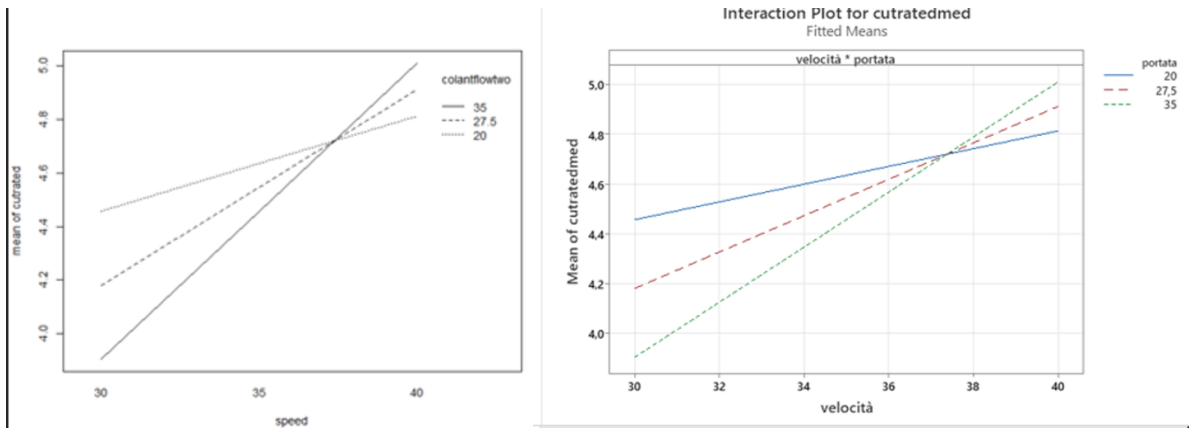


Figura 88 interaction plot "Rstudio" (Sinistra) e "Minitab" "NEW" (Destra)

Si nota dunque una corrispondenza quasi perfetta tra i due grafici.

3.5.5.3 Risultati Vdwtwo

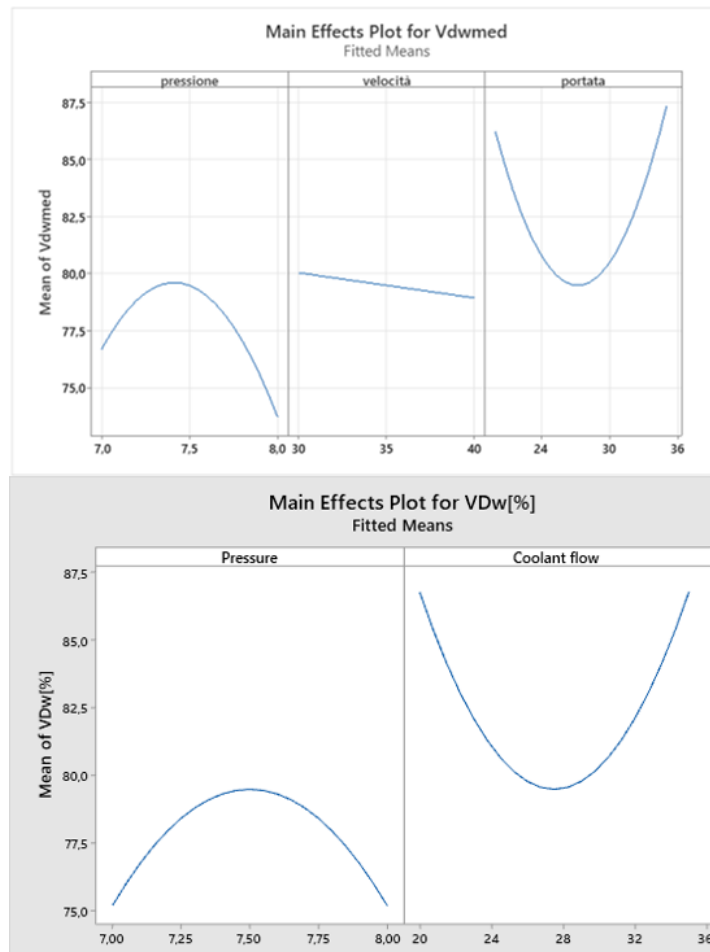


Figura 89 Grafico risposta media "Minitab" "NEW" (Sopra) E "Old" (Sotto)

In questo caso nella vecchia analisi, oltre a non essere riportato il parametro relativo alla velocità, si nota un comportamento leggermente differente a causa della pressione e, in minor parte, anche a causa della portata.

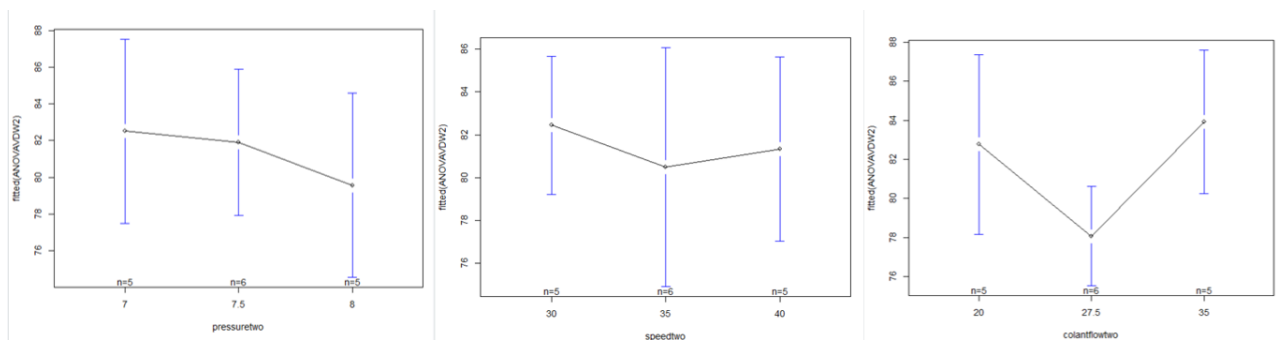


Figura 90 Grafici risposta media "Rstudio"

In questo caso i grafici ottenuti con "Rstudio" risultano completamente differenti rispetto a quelli ottenuti con "Minitab"

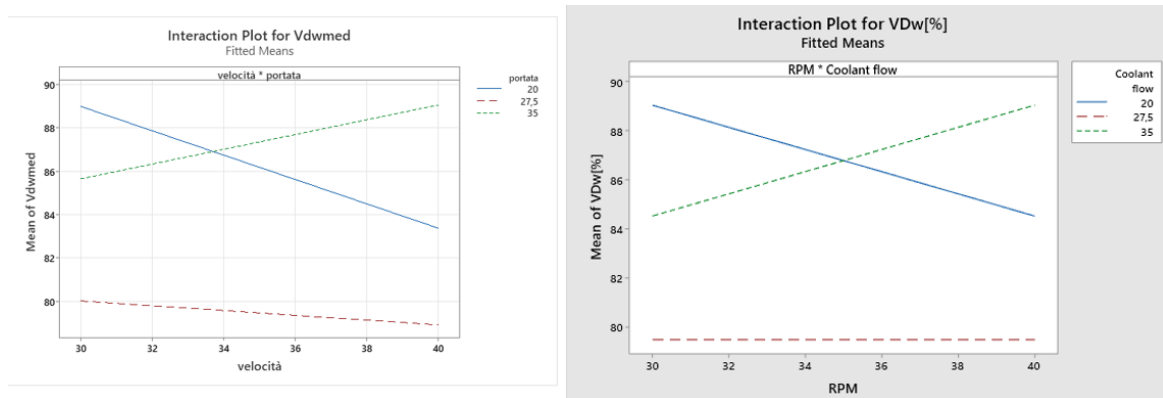


Figura 91 grafico interazione tra i fattori "Minitab" "NEW" (Sinistra) e "OLD" (Destra)

Anche per il grafico relativo all'interazione dei fattori si notano delle differenze tra la vecchia analisi e la nuova analisi condotta sul software "Minitab".

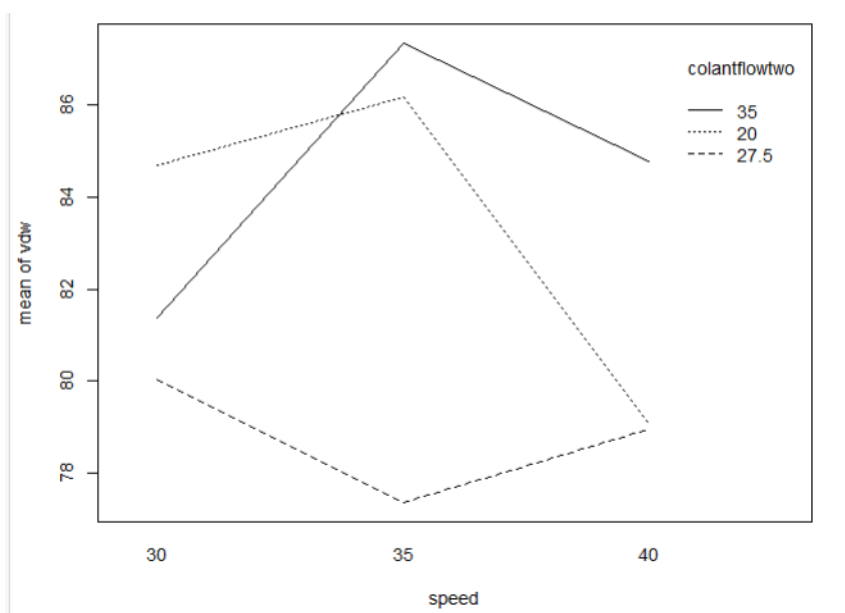


Figura 92 grafico interazione tra i fattori "Rstudio"

Il grafico relativo all'interazione dei fattori sulla risposta media ottenuto con "Rstudio" è completamente differente rispetto a quello ottenuto con "Minitab"

3.5.5 SUPERFICI DI RISPOSTA

Le superfici di risposta possono spiegare graficamente ciò che viene spiegato analiticamente attraverso le equazioni di regressione ovvero le relazioni tra i vari fattori. Talvolta può essere interessante guardare le superfici di risposta tramite i “contour plot” in modo da identificare facilmente le regioni di massimo o minimo della superficie. Si tratta infatti di una tecnica grafica utilizzata per rappresentare una superficie tridimensionale (x,y,z) in un piano bidimensionale (x,y) andando a tracciare delle sezioni a valori z costanti.

3.5.7.1 Analisi su “Minitab”

Il software “Minitab” permette di realizzare le superfici di risposta e i “contour plot” molto facilmente andando a selezionare l’apposita funzione.

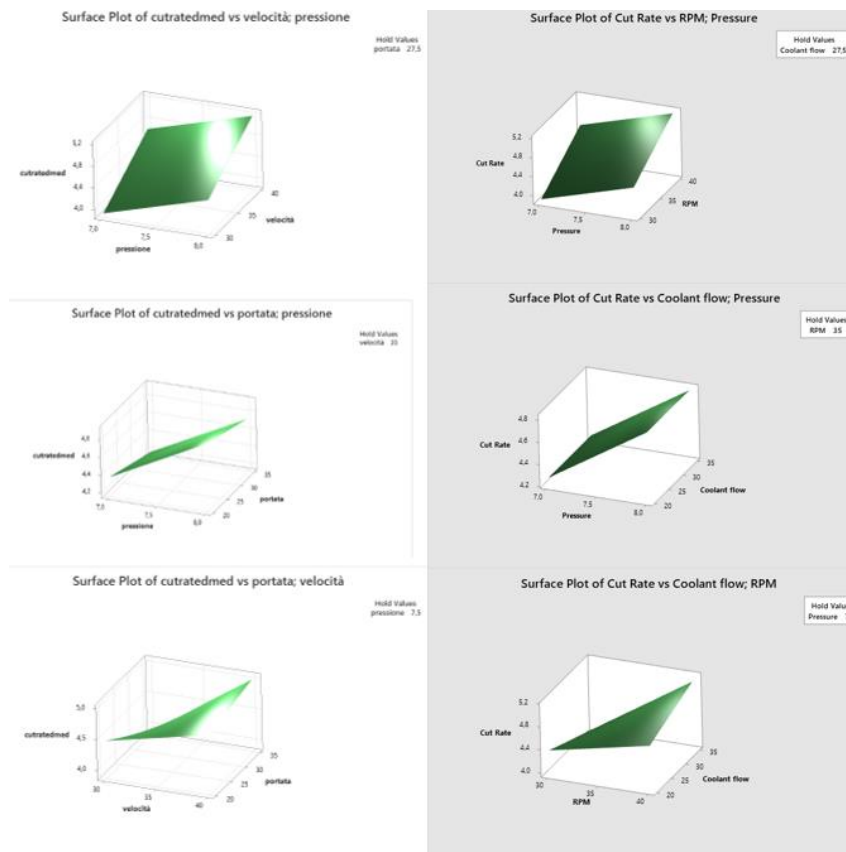


Figura 93 superfici di risposta Minitab "NEW" (Sinistra) "OLD" (Destra)

Si nota come le superfici di risposta individuate nell’analisi corrente e nell’analisi relativa al lavoro di tesi precedente sono identiche.

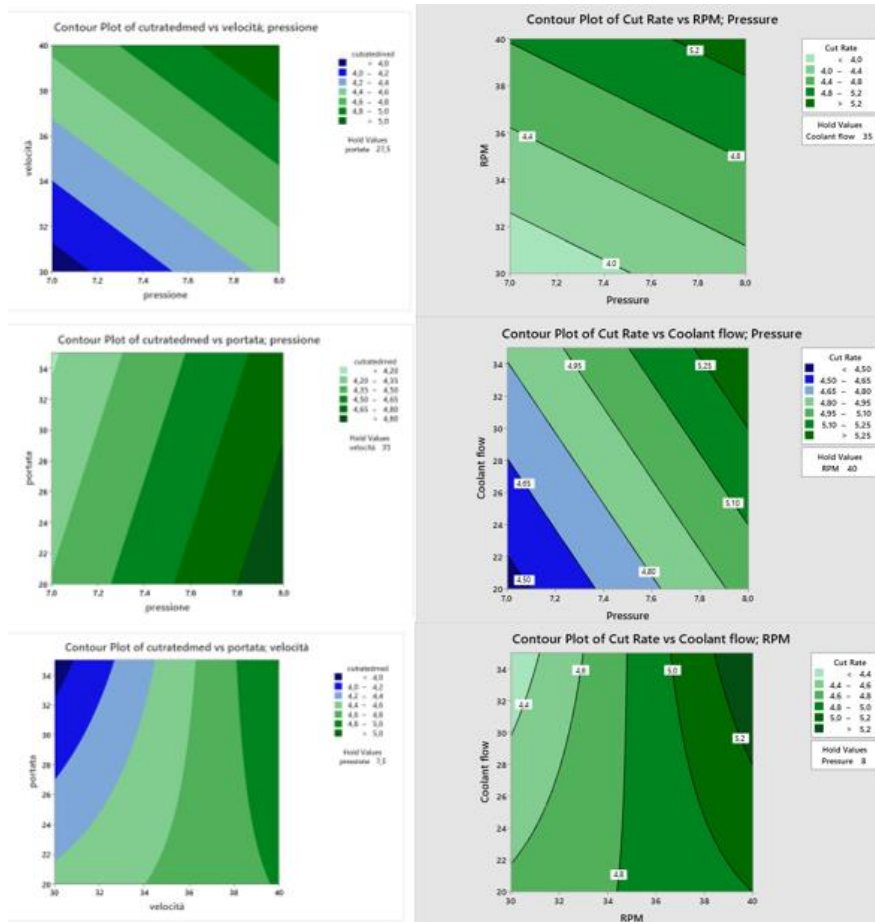


Figura 94 contour plot "Minitab" "NEW" (Sinistra) e "OLD" (Destra)

Si nota anche nel “contour plot” una corrispondenza quasi perfetta tra le due analisi. Nella nuova analisi si individuano però un maggior numero di livelli. Inoltre il “contour plot” relativo ai fattori di portata e velocità appare specchiato nella nuova analisi rispetto alla precedent

3.5.7.2 Analisi su "Rstudio"

Le superfici di risposta e i "contour plot" su Rstudio sono realizzati attraverso le funzioni "persp()" e "contour()".

```

250
251 #CUTRATE
252 persp(ANOVAcutrated2, x2~x1, image=TRUE, zlab="cutrate", phi=25, theta=25, contour=TRUE, col="lightblue")
253 persp(ANOVAcutrated2, x3~x1, image=TRUE, zlab="cutrate", phi=25, theta=25, contour=TRUE, col="lightblue")
254 persp(ANOVAcutrated2, x3~x2, image=TRUE, zlab="cutrate", phi=25, theta=25, contour=TRUE, col="lightblue")
255
256 contour(ANOVAcutrated2, ~ x1+x2, image=TRUE)
257 contour(ANOVAcutrated2, ~ x1+x3, image=TRUE)
258 contour(ANOVAcutrated2, ~ x2+x3, image=TRUE)
259

```

Figura 95 funzioni "persp()" e "contour()"

Nella funzione "persp()" si individuano anche le sottofunzioni "phi()" e "theta()". Tali sottofunzioni sono utilizzate per orientare la vista della superficie di risposta. In questo caso si sono scelti i valori di phi=25 e theta=25 in modo da ottenere la stessa orientazione offerta da "Minitab" e semplificare in questo modo il confronto. Per il medesimo scopo si riportano anche le superfici di risposta ottenute nell'analisi corrente attraverso "Minitab"

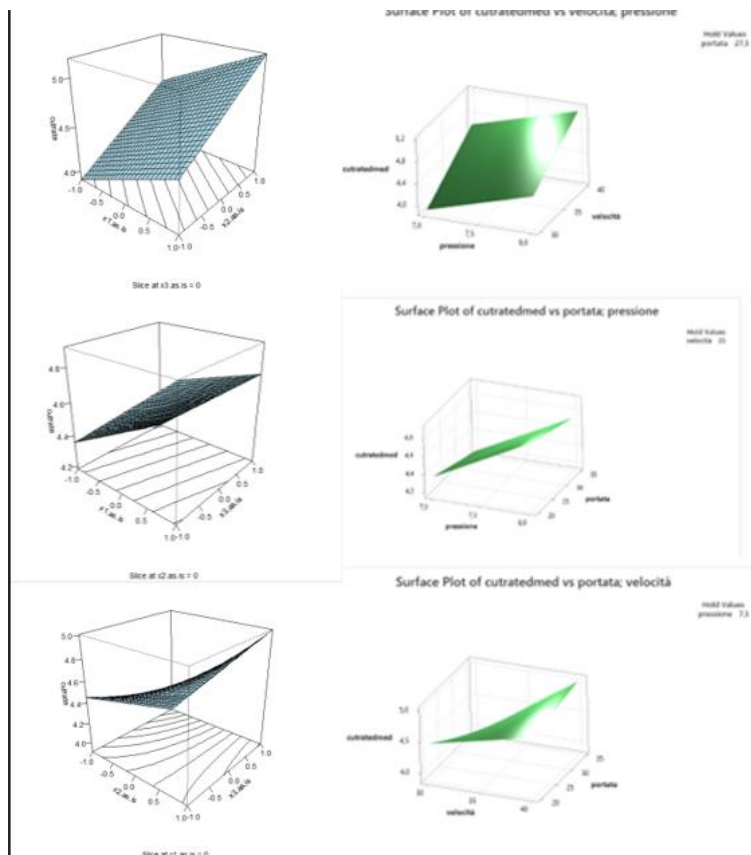
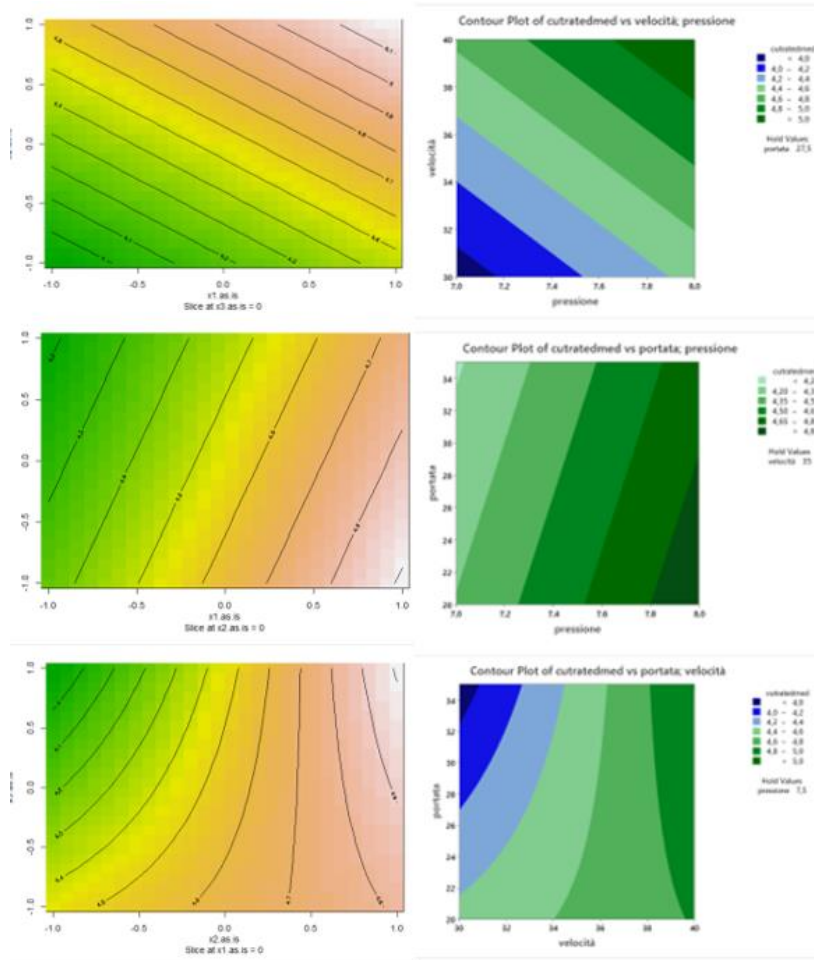


Figura 96 superfici di risposta "Rstudio" (Sinistra) e "Minitab" "NEW" (Destra)



Sia nelle superfici di risposta, sia nei “contouring plot” si nota una corrispondenza perfetta.

3.5.7.3 Risultati V_{dwtwo}

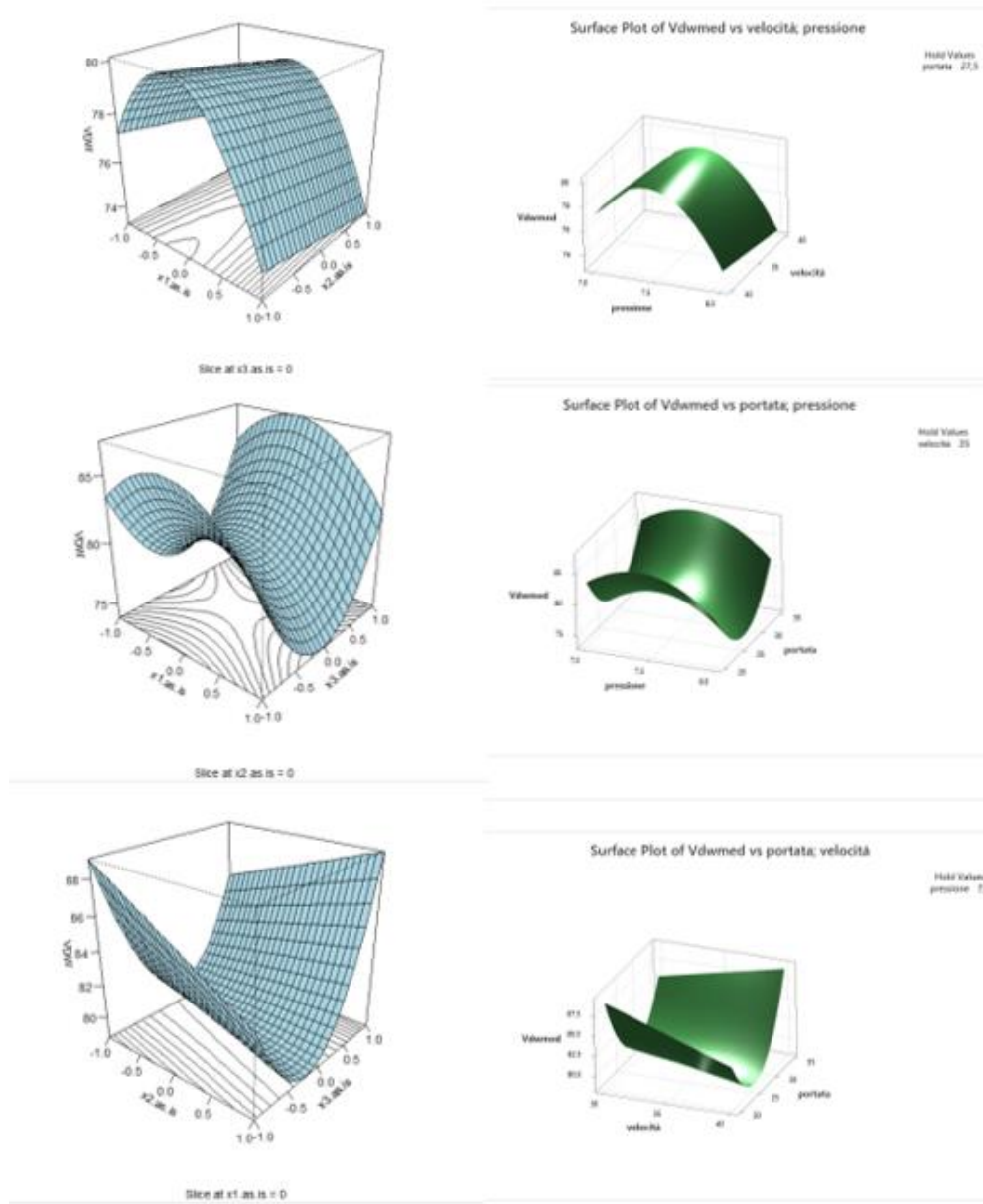
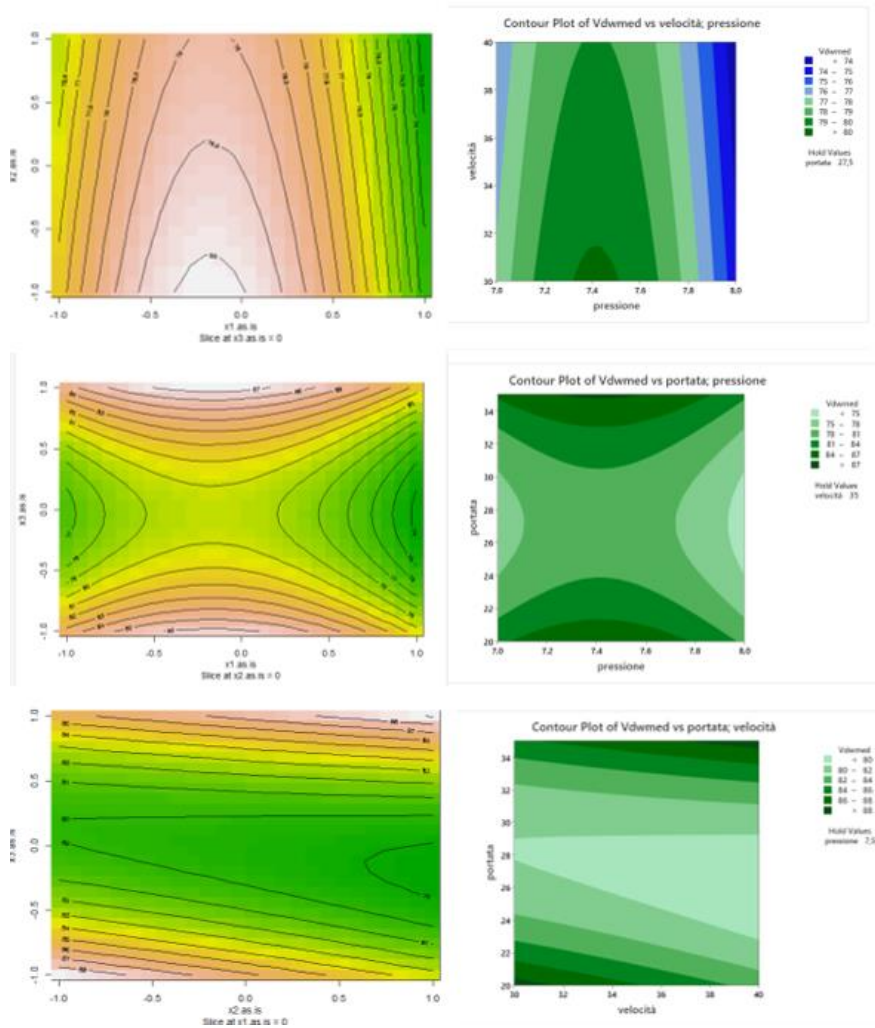


Figura 97 Superfici di risposta "Rstudio" (Sinistra) e "Minitab" "NEW" (Destra)



In questo caso sia nelle superfici di risposta, sia nei “contouring plot” si nota una corrispondenza perfetta.

3.6.7.4 Risultati Mtwo

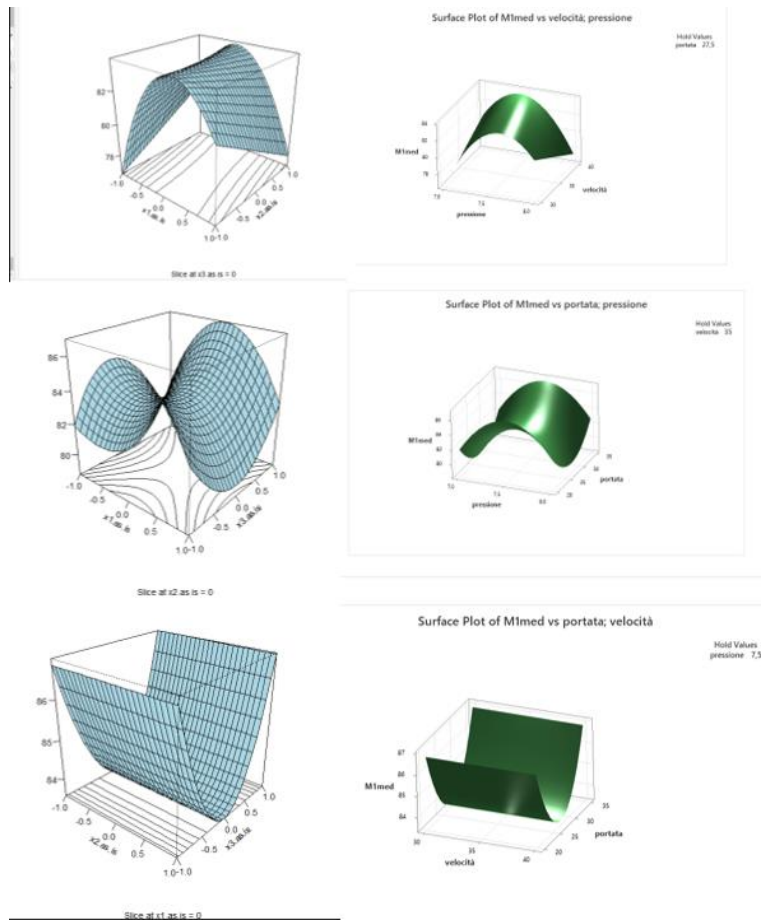


Figura 98 Superfici di risposta "Rstudio" (Sinistra) e "Minitab" "NEW" (Destra)

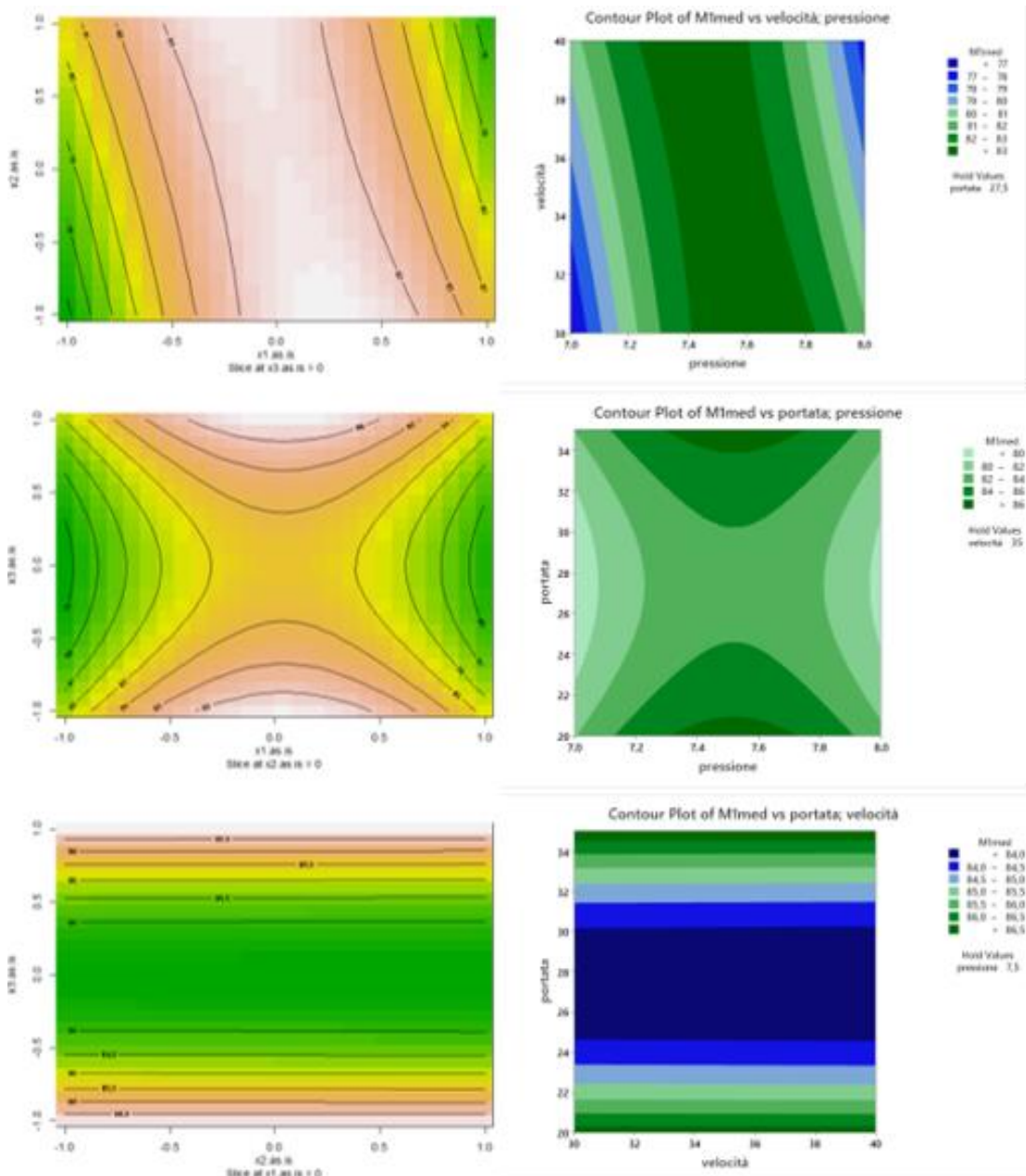


Figura 99 "contour plot" "Rstudio" (Sinistra) e "Minitab" "NEW" (Destra)

Si nota una corrispondenza perfetta tra gli output dei due software sia per le superfici di risposta sia per i "contour plot".

3.6 QUARTA PARTE DELL'ANALISI

In quest'ultima parte dell'analisi l'obiettivo è quello di sfruttare i modelli individuati al termine della seconda parte per individuare i parametri di pressione, velocità e portata che ottimizzino simultaneamente le tre risposte in esame.

Prima di procedere con l'analisi si riportano i modelli ottenuti. Come per la terza parte dell'analisi, tali modelli corrispondono a quelli ottenuti al termine della seconda parte alternativa. In tutti e tre i modelli si avranno dunque tutti e tre i fattori al primo ordine. Si fa inoltre riferimento ai modelli ottenuti nell'analisi non codificata. I valori dei tre fattori da inserire all'interno delle equazioni corrispondono dunque ai valori reali e non ai valori codificati nel range [-1, 1]. Si ricorda che i modelli ottenuti dai due software sono pressoché identici.

$$\begin{aligned} \text{cut rate} = & 2,9831 + 0,5520 * \text{pressure} - 0,06430 * \text{speed} - 0,1869 * \text{colantflow} + \\ & + 0,0050 * \text{speed} * \text{colantflow} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Vdw = & -705,3189 + 254,2496 * \text{pressure} - 1,76463 * \text{speed} - 9,1539 * \text{colantflow} + \\ & + 0,0602 * \text{speed} * \text{colantflow} - 17,1459 * \text{pressure}^2 + 0,1296 * \text{colantflow}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M1 = & -1088,8 + 297,77 * \text{pressure} + 5,5681 * \text{speed} - 3,2441 * \text{colantflow} + \\ & - 0,7428 * \text{pressure} * \text{speed} - 18,069 * \text{pressure}^2 + 0,05916 * \text{colantflow}^2 \end{aligned}$$

Oltre ai parametri di ottimo viene riportata anche la “desirability” d_i e la “composite desirability” D . Tali valori sono calcolati a partire dalla funzione di desiderabilità. Per ogni risposta $Y_i(x)$, una funzione di desiderabilità $d(Y_i)$ assegna numeri tra 0 e 1 ai possibili valori di Y_i , dove $d(Y_i) = 0$ rappresenta un valore completamente indesiderato e $d(Y_i) = 1$ rappresenta un valore di risposta ideale. Una classe utile di funzioni di desiderabilità è stata proposta da Derringer e Suich (1980). Riportiamo tale classe di funzioni nella seguente pagine.

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } Y(x) < L_i \\ \left(\frac{Y(x) - L_i}{T_i - L_i}\right)^s & \text{if } L_i < Y(x) < T_i \\ 1 & \text{if } Y(x) > T_i \end{cases}$$

Dove:

- Y(x) rappresenta la risposta ottimizzata
- L_i il valore sperimentale più piccolo ottenuto per la risposta in esame
- T_i il valore sperimentale più grande ottenuto per la risposta in esame

La “composite desirability” D rappresenta la media geometrica delle singole “desirability”. Viene dunque calcolata come:

$$D = ((d_1(Y_1) * (d_2(Y_2) * ... * (d_k(Y_k))^{1/k}$$

Dove:

- K rappresenta il numero di risposte

3.6.1 Analisi su “Minitab”

Sul software “Minitab” l’individuazione dei parametri che permettono di ottenere il meglio delle tre risposte è molto semplice. Esiste infatti la funzione “parameter optimizer” la quale permette di ottenere tali parametri.

Nuovamente si riportano i valori ottenuti nell’analisi precedente e nell’analisi corrente indicandoli rispettivamente con la dicitura “OLD” e “NEW”.

Solution

Solution	Pressure	RPM	Coolant flow	M1[%] Fit	VDw[%] Fit	Cut Rate Fit	Composite Desirability
1	7,47475	40	35	86,9434	89,0212	5,08369	0,878810

Solution

Solution	pressione	velocità	portata	M1med Fit	Vdwmed Fit	cutratedmed Fit	Composite Desirability
1	7,50505	40	35	86,9058	89,0480	5,01354	0,864726

Figura 100 parametri di ottimo "Minitab" "OLD" (Sopra) e "NEW" (Sotto)

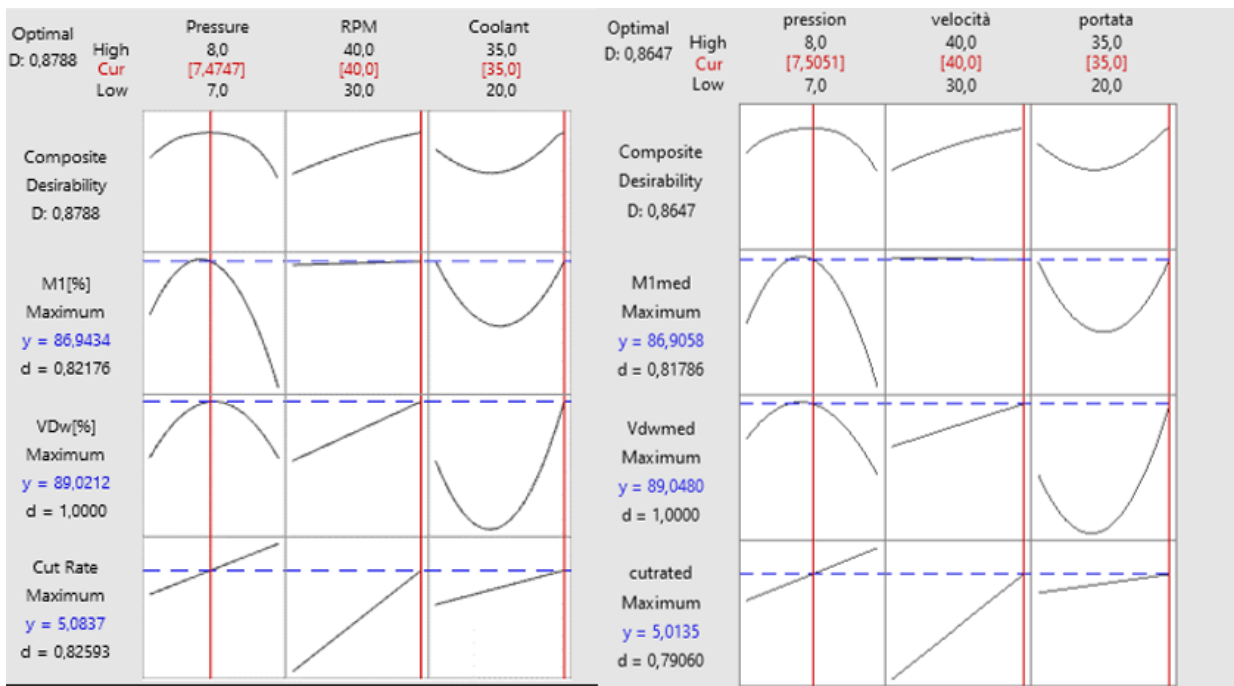


Figura 101 grafici di ottimizzazione delle risposte Minitab "New" (Destra) e "Old" (Sinistra)

Sulla sinistra dei tre grafici viene riportata la “desirability” d delle tre risposte e la “composite desirability” D. Per una maggiore facilità di lettura tali valori sono riportati nella tabella sottostante

Tabella 3 Risposte Minitab "OLD" e Minitab "NEW"

Risposta	Minitab "OLD"	Minitab "NEW"
M1	0.82176	0,81786
Vdw	1	1
Cutrate	0.82593	0.79060
Composite Desirability	0.8788	0.8647

Si nota una corrispondenza quasi perfetta tra l'analisi corrente e quella relativa al lavoro di tesi precedente.

3.6.2 Analisi su “Rstudio”

L’analisi su “Rstudio” si è dimostrata molto più complessa rispetto all’analisi su “Minitab”. Questo a causa dell’assenza di una funzione in grado di massimizzare più risposte in simultanea. Tale funzione era infatti presente nel pacchetto “JOP”, ma la sua ultima versione risale al 2013. Questa non risulta dunque compatibile con le ultime versioni del software.

Per realizzare tale parte dell’analisi si è dunque sfruttata la funzione “ga()” contenuta nel pacchetto “GA”. Si vuole puntualizzare che la sigla “GA” sta ad indicare “GENETIC ANALISES”. Tale pacchetto nasce infatti per questo tipo di analisi. La funzione “ga()” permette di ottenere il massimo di una singola funzione e dunque ben si presta all’analisi da effettuare.

Si riporta dunque il codice ideato per realizzare l’ottimizzazione dei tre parametri commentando nel dettaglio ogni passaggio.

Per ogni fattore si è definito un vettore contenente il range dei tre livelli. Tutti e tre i vettori identificati hanno la medesima lunghezza. Per dare una continuità alle parti precedenti dell’analisi sono stati chiamati rispettivamente “x1”, “x2” e “x3”.

```
286 + #####  
287 x1=seq(7, 8, by=0.0000001)  
288 x2=seq(30, 40, by=0.000001)  
289 x3=seq(20, 35, by=0.0000015)  
290
```

Figura 102 vettori “x1”, “x2” e “x3”

Per ogni risposta è stata poi definita una funzione contenente il modello individuato precedentemente. Si riporta a titolo di esempio la funzione “cutrate()”.

```
292  
293 + cutrate=function(x1, x2, x3){  
294     2.9831+0.5520*x1-0.06430*x2-0.1869*x3+0.0050*x2*x3  
295
```

Figura 103 funzione “cutrate()”

Tale funzione è stata dunque inserita all’interno della funzione “ga” come sotto-funzione. Argomento della funzione “cutrate()” sono i tre vettori “x1”, “x2” e “x3”. Oltre a tale sotto-funzione, la funzione “ga()” richiede anche i valori minimi dei tre vettori contenuti nella sotto-funzione “lower()” e i valori massimi contenuti nella sotto-funzione “upper()”. Nelle sotto-funzioni “maxiter()” e “run()” sono invece inseriti il numero massimo e il numero di iterazione da eseguire. Il risultato di tale funzione è salvato nel file “GA_cutrate” e in seguito inserito nella funzione “summary()”.

```

296 }
297 GA_cutrate=ga(type = "real-valued",
298     fitness= function(x) +cutrate(x[1],x[2],x[3]),
299     lower=c(7,30,20),upper=c(8,40,35),
300     maxiter=1000,run=1000)
301
302 summaryGA_cutrate=summary(GA_cutrate)
303 summaryGA_cutrate
304

```

Figura 104 funzione "ga()"

Si riporta ora il contenuto del file "summaryGA_cutrate". In tale file si nota il massimo valore assunto dalla funzione "cutrate()" negli intervalli contenuti in "x1","x2" e "x3" e i valori x1,x2 e x3 che permettono di ottenere tale valore

```

GA settings:
Type                = real-valued
Population size     = 50
Number of generations = 10000
Elitism             = 2
Crossover probability = 0.8
Mutation probability = 0.1
Search domain =
  x1 x2 x3
lower  7 30 20
upper  8 40 35

GA results:
Iterations                = 10000
Fitness function value = 5.283709
Solution =
      x1      x2      x3
[1,] 7.999088 39.99879 34.90425

```

Figura 105 file "summaryGA_cutrate"

Ciò è stato ripetuto anche per le risposte “Vdw” e “M1”.

```

GA settings:
Type = real-valued
Population size = 50
Number of generations = 10000
Elitism = 2
Crossover probability = 0.8
Mutation probability = 0.1
Search domain =
  x1 x2 x3
lower 7 30 20
upper 8 40 35

GA results:
Iterations = 10000
Fitness function value = 89.27533
Solution =
  x1 x2 x3
[1,] 7.41398 39.99634 34.99352
>

GA settings:
Type = real-value
Population size = 50
Number of generations = 10000
Elitism = 2
Crossover probability = 0.8
Mutation probability = 0.1
Search domain =
  x1 x2 x3
lower 7 30 20
upper 8 40 35

GA results:
Iterations = 10000
Fitness function value = 87.19017
Solution =
  x1 x2 x3
[1,] 7.620055 30.00522 34.98043
>

```

Figura 106 file "summaryGA_Vdw" (Sinistra) e "summaryGA_M1" (Destra)

Si è dunque realizzato un file di tipo data frame contenente i valori dei fattori che vanno a massimizzare le singole risposte. Per semplificare tale procedimento conviene andare a creare prima una matrice contenente tali valori. Si riporta di seguito il procedimento utilizzato per creare il file, denominato “MAX_SINGOLA_RISPOSTA_FATTORI” e il suo contenuto.

```

337
338 #### PROSEGUO DELL'ANALISI
339
340 MAX_SINGOLA_RISPOSTA_FATTORI_MATRIX=matrix(c(summaryGA_cutrate$solution,summaryGA_vdw$solution,summaryGA_m1$solution),
341      nrow=3,
342      ncol=3)
343
344 MAX_SINGOLA_RISPOSTA_FATTORI=data.frame(factor=c("pressure","speed","colantflow"),
345      cutrate=MAX_SINGOLA_RISPOSTA_FATTORI_MATRIX[,1],
346      vdw=MAX_SINGOLA_RISPOSTA_FATTORI_MATRIX[,2],
347      m1=MAX_SINGOLA_RISPOSTA_FATTORI_MATRIX[,3])
348

```

Figura 108 costruzione file "MAX_SINGOLA_RISPOSTA_FATTORI"

	factor	cutrate	vdw	m1
1	pressure	7.999088	7.41398	7.620055
2	speed	39.998786	39.99634	30.005219
3	colantflow	34.904253	34.99352	34.980435

Figura 107 file "MAX_SINGOLA_RISPOSTA_FATTORI"

Viene ora realizzato un dataframe contenente il massimo delle singole risposte. Analogamente a quanto fatto per il file "MAX_SINGOLA_RISPOSTA_FATTORI" viene illustrato la costruzione e il contenuto di tale file denominato "TARGET_RISPOSTA"

```

348
349 TARGET_RISPOSTA=data.frame(response=c("cutrate","vdw","m1"),
350                             target=c(summaryGA_cutrate$fitness,summaryGA_vdw$fitness,summaryGA_m1$fitness))
351

```

Figura 110 costruzione file "TARGET_RISPOSTA"

	response	target
1	cutrate	5.283709
2	vdw	89.275330
3	m1	87.190173

Figura 109 file "TARGET_RISPOSTA"

Viene ora definita la funzione "fun_max()" la quale effettua la somma delle tre funzioni "cutrate()", "vdw()" e "M1()". Ogni funzione viene però divisa per la rispettiva "RISPOSTA TARGET". In questo si ottiene la somma di tre funzioni rappresentanti l'andamento della "composite desirability" delle tre risposte negli intervalli "x1", "x2" e "x3".

```

351
352 fun_max=function(x1,x2,x3){
353     ((2.98+0.552*x1-0.0643*x2-0.1869*x3+0.005*x2*x3)/TARGET_RISPOSTA[1,2])+
354     ((-705+254*x1-1.765*x2-9.15*x3+0.0602*x2*x3-17.15*x1^2+0.1296*x3^2)/TARGET_RISPOSTA[2,2]);
355     ((-1089+297.8*x1+5.57*x2-3.24*x3-0.743*x1*x2-18.07*x1^2+0.0592*x3^2)/TARGET_RISPOSTA[3,2])
356 }

```

Figura 111 funzione "fun_max()"

Tale funzione è dunque inserita nuovamente all'interno della funzione "ga()". Argomento della sottofunzione "fun_max()" sono nuovamente i tre vettori "x1", "x2" e "x3".

```

357
358 GA_fun_max=ga(type = "real-valued",
359              fitness= function(x) +fun_max(x[1],x[2],x[3]),
360              lower=c(7,30,20),upper=c(8,40,35),
361              maxiter=1000,run=1000)
362
363 summaryGA_fun_max=summary(GA_fun_max)
364 summaryGA_fun_max
365

```

Figura 112 funzione "ga()" con sottofunzione "fun_max()"

Tale funzione andrà dunque ad individuare i parametri per cui si ottiene il massimo della sottofunzione “fun_max()” ovvero la massima somma delle tre “composite desirability”.

Si riportano dunque i parametri per cui si ottiene il massimo di tale funzione all’interno del dataframe “MAX_RISPOSTE_FATTORI”

	pressure	speed	colantflow
x1	7.535718	39.98877	34.97412

Figura 113 file “MAX_RISPOSTE_FATTORI”

Sostituendo tali valori all'interno delle tre funzioni "cutrate()", "vdw()" e "M1()" si hanno le tre risposte ottenute con i parametri di processo ottimizzati. Tali risposte sono salvate all'interno del dataframe "MAX_RISPOSTE".

	response	max
1	cutrate	5.027735
2	vdw	88.974937
3	m1	86.753019

Figura 114 file "MAX_RISPOSTE"

Avendo le tre risposte ottimizzate è possibile calcolare le “desirability” delle singole risposte. Queste sono inserite nel dataframe “DESIRABILITY_SINGOLE_RISPOSTE”.

```

376 DESIRABILITY_SINGOLE_RISPOSTE=data.frame(cutrate=min((MAX_RISPOSTE[1,2]-min(df$cutrated))/(max(df$cutrated)-min(df$cutrated)),1),
377      vdw=min((MAX_RISPOSTE[2,2]-min(df$vdw))/(max(df$vdw)-min(df$vdw)),1),
378      m1=min((MAX_RISPOSTE[3,2]-min(df$m1))/(max(df$m1)-min(df$m1)),1)
379
380

```

Figura 116 calcolo delle "desirability" delle singole risposte

cutrate	vdw	m1
0.8018619	1	0.7972383

Figura 115 "DESIRABILITY_SINGOLE_RISPOSTE"

La “composite desirability”, calcolata attraverso la media geometrica, risulta essere pari a 0,8614

3.6.3 Confronto risultati “Rstudio” e “Minitab”

il confronto tra gli output dei due software avverrà attraverso l’ausilio di due tabelle. Nella prima si andranno a confrontare i parametri di ottimo e le risposte ottimizzate individuate dai due software. Nella seconda verranno invece confrontate le “desirability” e le “composite desirability”.

Tabella 4 Fattori e risposte Minitab "NEW" e Rstudio

FATTORI E RISPOSTE			
		Software “Minitab” “NEW”	Sofyware “Rstudio”
FATTORI	Pressione [Mpa]	7,505	7,5531
	Velocità [RPM]	40	39,9707
	Portata [l/s]	35	34,9984
RISPOSTE	Cut rate	5,01354	5,0357
	Vdw	89,0480	88,947
	M1	86,9058	86,6959

Tabella 5 “Desirability” e “composite desirability” Minitab "NEW" e Rstudio

“desirability” e “composite desirability”		
	Software Minitab “NEW”	Software “Rstudio”
M1	0,81786	0,7972
Vdw	1	1
Cutrate	0.79060	0,8019
Composite Desirability	0.8647	0,8614

In entrambe le tabelle si può notare una corrispondenza quasi perfetta

3.7 CONCLUSIONI SUI DUE SOFTWARE

Osservando la terza parte dell'analisi, ovvero una parte relativa alla creazione di grafici atti a validare, o meglio chiarire l'analisi precedente si possono trarre due conclusioni principali. La prima è che lo sfruttare il modello proposto nella seconda parte dell'analisi alternativa non comporta sostanziali differenze con lo sfruttare il modello proposto nell'analisi relativa al lavoro di tesi precedente. La seconda è che non si hanno sostanziali differenze negli output proposti dal software "Minitab" e dal software "Rstudio". Ciò risulta veritiero soprattutto per i grafici relativi ai residui, nonostante nel "grafico di probabilità normale dei residui" vengano seguite due analisi differenti, e nella realizzazione delle superfici di risposta. Per quanto riguarda invece il grafico relativo alla risposta media di ogni fattore sulla risposta che si sta studiando si è individuata una perfetta corrispondenza tra i grafici solo per la risposta relativa al "cutrate". Ciò può essere imputabile in primis alla funzione utilizzata per realizzare il grafico e in secondo luogo anche all'ordine del modello che descrive le tre risposte. Si nota infatti che il "cutrate" viene descritto con un modello al cui interno non compaiono termini di secondo ordine ($pressure^2$), a differenza invece del "Vdw" e del "M1". Si può dunque ipotizzare che la funzione utilizzata, "plotmeans()", ben rappresenta modelli del primo tipo e mal si adatta ai modelli del "Vdw" e del "M1".

Per quanto riguarda la quarta e ultima parte dell'analisi si vuole far notare che non sono state utilizzate delle funzioni specifiche, ma si è realizzato un codice per ottenere degli output ben precisi. Tali output, i quali consistono nell'obiettivo e dunque nella conclusione dell'analisi stessa" si sono rivelati pressoché identici sia considerando il software "Minitab" e il software "Rstudio", sia considerando l'analisi su "Minitab" corrente e quella del lavoro precedente. L'utilizzo, dunque, di un modello più completo non ha portato a sostanziali differenze rispetto a quanto fatto precedentemente confermando quanto suggerito dai p-value ottenuti all'interno delle tabelle dell'"ANOVA".

Mentre si è però sfruttato il software "Minitab" quasi al massimo delle sue potenzialità il software "Rstudio" permette un numero estremamente più elevato di analisi le quali potrebbero portare al raggiungimento di modelli più completi e precisi. Nella realizzazione del lavoro di tesi attuale si vuole dunque sfruttare quest'ultimo software realizzando comunque la stessa analisi anche su "Minitab" in modo da poter avere comunque una conferma ed evitare che problematiche non ancora riscontrate vadano a influire negativamente sul lavoro di tesi da svolgere o sull'azienda.

4. SETUP SPERIMENTALE

In questo paragrafo verranno presentati e spiegati gli strumenti utilizzati per analizzare le sfere prelevate dal caricatore della macchina lappatrice 75. Ad ogni intervallo le sfere sono state prelevate casualmente dal caricatore andando cercando di prelevarle per tutta la lunghezza di quest'ultimo.

4.1 Comparatore

Il comparatore è uno strumento di misura utilizzato per misure di spostamento lineare. Basa il suo funzionamento sulla lettura dello spostamento di un'asta cilindrica mobile che scorre all'interno di una guida tubolare. All'estremità dell'asta si trova il tastatore, anche detto palpatore, il quale rappresenta l'elemento del comparatore a contatto con la superficie dell'oggetto da misurare. Gli spostamenti dell'asta vengono amplificati mediante un cinematismo. La pressione di misura, stabilita in 140 grammi, è data da una molla elicoidale fissata con una estremità all'asta del tastatore e con l'altra estremità all'involucro. I comparatori normalmente vengono realizzati con corse utili comprese tra 1 e 100 mm, mentre la risoluzione è normalmente centesimale (0,01 mm), anche se vengono realizzati comparatori di precisione bimillesimali (risoluzione 0,002 mm). A seconda del sistema di lettura, il comparatore può essere classificato:

- comparatore a quadrante, dove la lettura si esegue grazie ad un quadrante ad orologio;
- comparatore digitale, dove la lettura si esegue direttamente su un indicatore elettronico digitale.

Il comparatore presente sulla linea di produzione è della seconda tipologia. In questi ultimi gli ingranaggi movimentano un piccolo encoder collegato ad un contatore elettronico. Minimi spostamenti dell'asta si traducono così in impulsi elettrici conteggiabili da un indicatore elettronico.



Figura 117 Comparatore in linea

Prima di effettuare la misura le sfere, insieme al campione master, sono state immerse in una soluzione di acqua e Tecniclean ovvero un liquido refrigerante in modo da uniformare la temperatura. [18]

Inseguito si è proceduto con la calibrazione del comparatore mediante il master. Si effettua infatti la misura sul master e si setta lo strumento su un valore che differisce da comparatore a comparatore. Si procede infine con la misura delle sfere salvando di volta in volta la misura su un software presente su un elaboratore collegato al comparatore stesso.

I risultati relativi a tale strumento saranno riportati nelle tabelle del capitolo 6. In tali tabelle per ogni ora a cui è stata effettuata la misura viene riportato un solo valore numerico. Tale valore è il frutto della media aritmetica effettuata su 10 misure condotte su altrettante sfere. La media, indicata come “Dws(x)”, viene direttamente calcolata dal software presente sull’ elaboratore collegato al comparatore. Oltre alla media tale software va a calcolare anche:

- Data e orario della misura
- Scostamento minimo indicato come DwsMin
- Scostamento massimo indicato come DwsMax
- Scostamento massimo meno Scostamento minimo indicato come VDwl (R)

Si riporta a titolo di esempio l'output relativo all'ora 00:00 del TEST 1

Tabella 6 Output comparatote TEST 1 ORA 00:00

<i>ORA 00:00</i>	
<i>TYPE</i>	<i>17,462</i>
<i>DATE</i>	<i>18/02/2022</i>
<i>TIME</i>	<i>8:02</i>
<i>Dws (X) [μm]</i>	<i>10,861</i>
<i>Dws (S) [μm]</i>	<i>0,182</i>
<i>DwsMin [μm]</i>	<i>10,64</i>
<i>DwsMax [μm]</i>	<i>11,33</i>
<i>VDwl (R) [μm]</i>	<i>0,69</i>
<i>1</i>	<i>10,8</i>
<i>2</i>	<i>10,82</i>
<i>3</i>	<i>11,33</i>
<i>4</i>	<i>10,85</i>
<i>5</i>	<i>10,74</i>
<i>6</i>	<i>10,64</i>
<i>7</i>	<i>10,97</i>
<i>8</i>	<i>10,72</i>
<i>9</i>	<i>10,8</i>
<i>10</i>	<i>10,94</i>

Tale misura è dunque una delle poche misure che sono state effettuate sulla linea di produzione e non all'interno del laboratorio presente in azienda

4.2 MWA

L'MWA 160D [19][20][21], prodotto SKF, è uno strumento in grado di fornire misure e analisi di:

- Rotondità
- Armoniche
- Ondulazione
- Planarità

La realizzazione della misura prevede di appoggiare la sfera nell'apposito mandrino dopo averla adeguatamente pulita attraverso un foglio di carta ottica. La sfera non viene messa direttamente a contatto con il mandrino ma viene inserita all'interno di un nasello, il quale mediante un collegamento filettato è in grado di ruotare assieme al mandrino. Mediante un sistema pneumatico la sfera viene tenuta in battuta con il nasello. Si riporta nella seguente figura uno schema esplicativo per la messa in rotazione del mandrino.

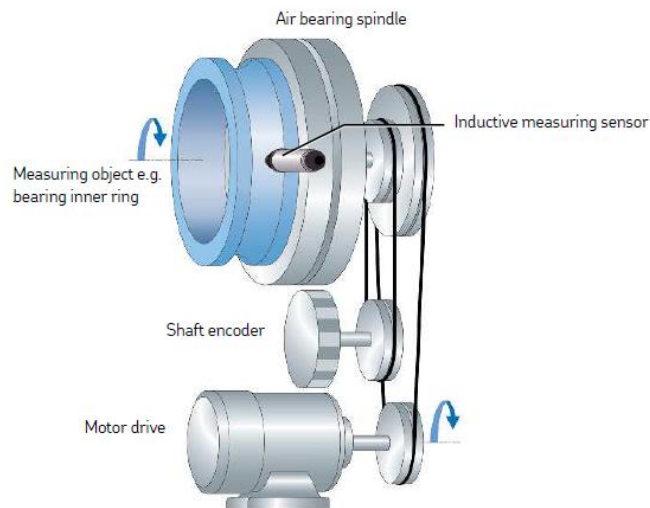


Figura 118 Schema messa in rotazione mandrino MWA

Durante la rotazione della sfera un sensore posto lateralmente alla sfera entra in contatto con la superficie di quest'ultima rilevandone il profilo. Quest'ultimo è dunque trasmesso ad un software il quale è in grado di estrapolare le caratteristiche che si vogliono esaminare. Queste ultime sono:

- Δr : differenza tra il raggio della circonferenza circoscritta al profilo misurato e il raggio della circonferenza inscritta. Entrambi sono concentriche al “*Least Square Mean Circle (LSC)*”, ovvero la circonferenza posizionata in modo che la somma del quadrato delle sue variazioni sia un minimo del profilo campionato del componente.

$$\Delta r = \varnothing_{cir} - \varnothing_{ins} \quad (1)$$

- VDw : variazione del diametro, calcolata come differenza tra il diametro maggiore e il diametro minore di una sfera.

$$VDw = Dws_{max} - Dws_{min} \quad (2)$$

- Ondulosità, misurata in $\mu\text{m/s}$. Quest'ultima viene studiata ricorrendo all'utilizzo dell'analisi

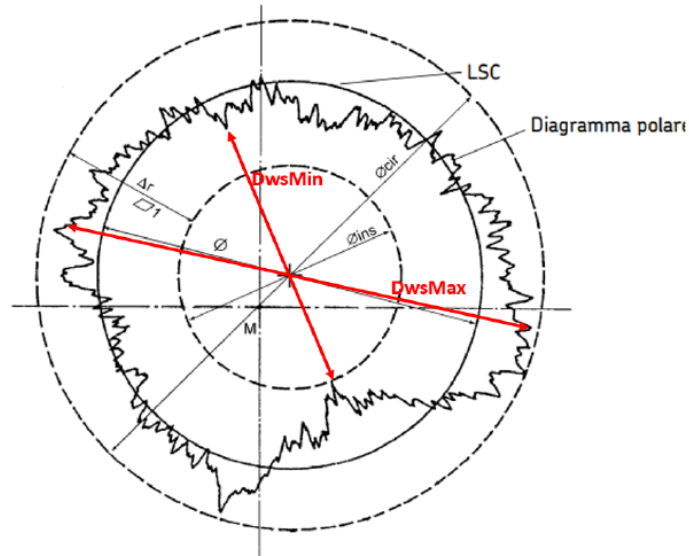


Figura 119 Diagramma polare

di Fourier con la quale le onde vengono scomposte in onde più semplici a diverse frequenze; ad ogni range di frequenza sono associate delle bande di ondulosità in base a quante volte un'onda si ripete durante un giro completo della sfera. Calcolando la velocità di oscillazione massima si ottiene il valore di ondulosità riferito alla rispettiva banda. Si riporta nella successiva tabella il range di frequenze associate ad ogni banda associato al numero di volte che l'onda si ripete (wcp)

Tabella 7 Bande di frequenza

WAVE BAND	L BAND	M BAND	MI BAND	H BAND
<i>Wcp</i>	2-4	5-25	5-8	26-254
<i>Frequency [Hz]</i>	20-50	50-300	50-100	300-1800

4.3 Stereomicroscopio

Tale strumento viene utilizzato per identificare tutti quei difetti, i quali possono essere individuati solo attraverso uno scrupoloso controllo a campione. I difetti in questione sono:

- Solchi
- Bolli
- Grippature
- Bruciate di lima
- Graffiature
- Temper lines e re-hardening

Nella realtà è impossibile eliminare completamente tali difetti, ma mediante l'esperienza acquisita negli anni è stato possibile minimizzare il numero dei difetti sulle sfere e la loro entità, in modo che questi rientrino nelle tolleranze richieste dai vari clienti.

In quanto questo lavoro di tesi si concentra solo su sfere non finite ma su cui è stato eseguito solo la prima fase di lappatura si è deciso di prestare attenzione solo ai difetti di Temper lines e re-hardening. Tali difetti sono dovuti al fatto che le sfere, durante la lavorazione, possono entrare in contatto tra loro e, strisciando tra loro, si verificano dei surriscaldamenti localizzati. A seconda delle temperature raggiunte si avrà il difetto della temper lines e o del re-hardening.

- Re-hardening (comunemente chiamato rigato lucido), la temperatura locale raggiunge la temperatura di austenitizzazione, la zona della sfera riscaldata viene raffreddata immediatamente dal lubrorefrigerante e di fatto subirà un ritempra. Ne consegue che sulla superficie è possibile vedere delle righe lucide.



Figura 120 Re-hardening

- Re-tempering (comunemente chiamato rigato nero), la temperatura locale non raggiunge la temperatura di austenitizzazione, pertanto si ha solo un rinvenimento nella zona interessata. In questo caso sulla superficie appaiono delle righe nere [22]



Figura 121 Re-tempering

4.4 RUGOSIMETRO

Il rugosimetro SURFTEST SV-3100 è uno strumento in grado di acquisire il profilo di una superficie mediante un tastatore e di restituire diverse misure di rugosità. La realizzazione della misura prevede di inserire la sfera nell'elemento porta-sfera che meglio si adatta alla misura della sfera che vogliamo esaminare. Una volta fatto ciò il porta-sfera viene inserito all'interno di un cilindro cavo, dove viene bloccato mediante l'ausilio di una vite. Tale cilindro si trova al di sopra di una slitta la cui posizione è regolabile attraverso due viti micrometriche. Spostando la slitta è possibile fare in modo che il tastatore si trovi sul massimo della sfera sia lungo la direzione x, sia lungo la direzione y. Una volta individuato tale punto è possibile azzerare lo strumento e dunque realizzare la misura.



Figura 122 rugosimetro SURFTEST SV-3100

Nella realizzazione di questo lavoro di tesi si è deciso di studiare l'indice di rugosità denominato R_a ed espresso in micron. Questo viene calcolato come il valore medio aritmetico degli scostamenti (presi in valore assoluto) del profilo reale della superficie rispetto alla linea media. Tale misura è riferita ad una lunghezza di base l (in questo studio pari a 0,84mm) del profilo analizzato per evitare l'influenza di altri tipi di irregolarità.

4.5 Termometro a mercurio

Tale strumento è stato utilizzato per misurare la temperatura del lubro-refrigerante utilizzato per bagnare le sfere. Questo circola all'interno di un impianto centralizzato e fuoriesce da due ugelli posti in prossimità del punto in cui le sfere entrano nelle gole di placca e mola. È stata misurata sia la temperatura del lubrorefrigerante all'uscita dagli ugelli sia la temperatura del lubrorefrigerante prima che questo rientri in circolo nell'impianto centralizzato. La temperatura di quest'ultimo è soggetta sia al periodo dell'anno in cui si effettua la misura sia alle condizioni metereologiche. In media si è individuata una temperatura di 27° all'uscita degli ugelli e un ΔT medio di circa 1° e mai superiore a 1,5°.

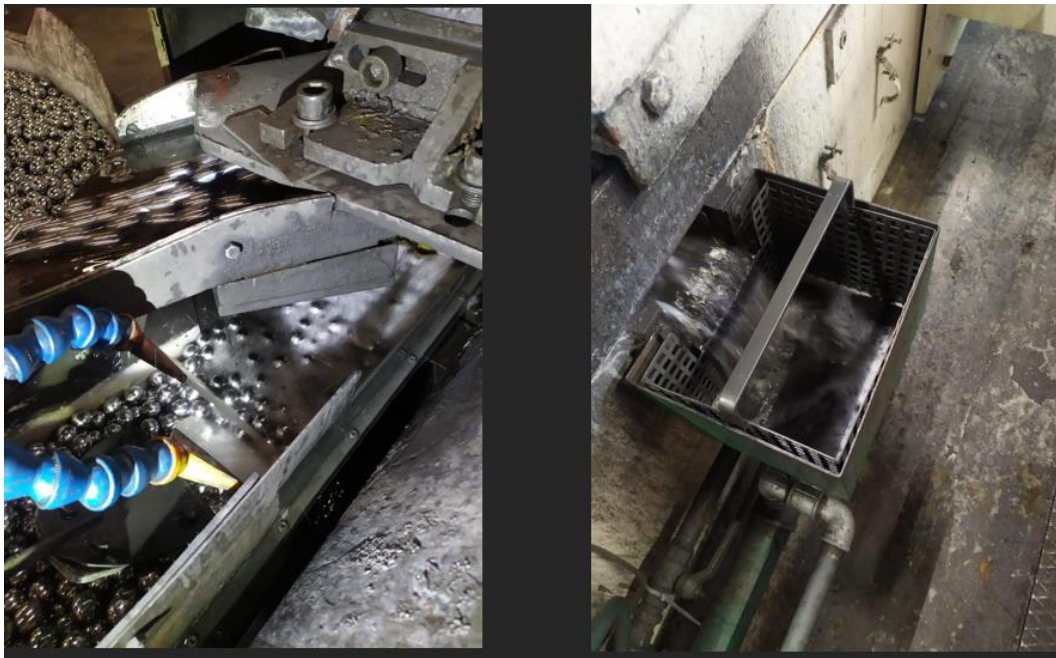


Figura 123 ugelli per la fuoriuscita di lubro-refrigerante (sinistra) vaschetta per la raccolta di lubro-refrigerante (destra)

4.6 MANOMETRO

Oltre agli strumenti necessari al controllo della qualità delle sfere in questo paragrafo si vogliono discutere anche gli strumenti utilizzati per imporre i tre parametri di processo. Il primo che si vuole presentare è il manometro ovvero lo strumento montato direttamente sulla macchina utilizzato per visualizzare la pressione di spinta. Questa viene regolata mediante una manopola, la quale va a variare la quantità di olio presente all'interno della camera di un cilindro responsabile dell'applicazione del carico sulle sfere. Durante il processo di lappatura l'addetto macchina è tenuto a controllare il manometro in quanto la pressione tende a diminuire nel tempo. Ciò può essere dovuto a fughe di olio da una camera all'altra del cilindro nonostante la presenza di guarnizioni. Per consentire il distacco di placca e mola al termine della lavorazione si agisce su una valvola (4 vie 2 posizioni prodotta dalla "ATOS") che permette la gestione del flusso dell'olio. Al termine della lavorazione, infatti, viene commutata la configurazione di tale valvola mettendo in comunicazione le due camere del cilindro e dunque eliminando la pressione nella camera di spinta. In questo modo l'intero gruppo di spinta è in grado di muoversi lungo delle guide e dunque la mola si allontana dalla posizione di lavoro. Altre fughe di olio possono dunque avvenire attraverso tale valvola.



Figura 124 Manometro

4.7 FLUSSOSTATO

Il flussostato, anche detto misuratore di portata, sfruttato nella campagna sperimentale è un sensore di flusso ad abbraccio prodotto dalle Keyence. Tale tipologia di sensore, a differenza delle altre tipologie di misuratori di portata, permette il passaggio di fluido e dunque evita l'introduzione di perdite di carico. Inoltre, può essere montato e smontato facilmente evitando il fermo macchina.

Tale strumento permette di misurare la portata attraverso il confronto di due segnali ad ultrasuoni. Il primo segnale viaggia dal punto A al punto B del flussostato. Il secondo segnale invece viaggia dal punto B al punto A. confrontando i due segnali, il flussostato è in grado di monitorare stabilmente la portata. [23]

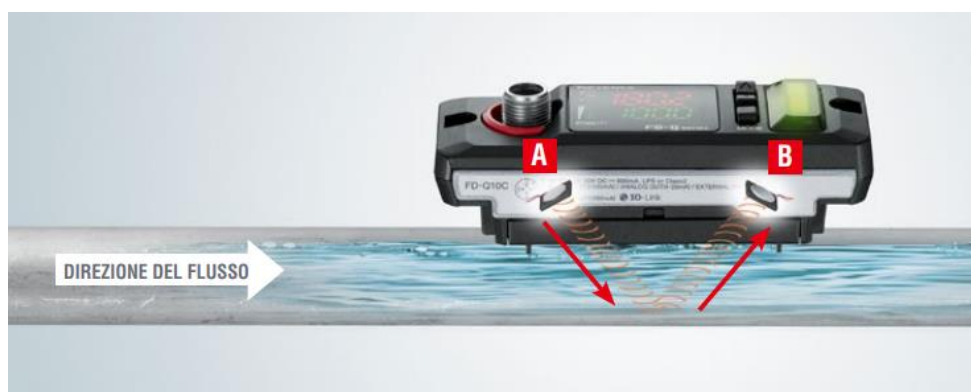


Figura 126 Principio di funzionamento del flussostato

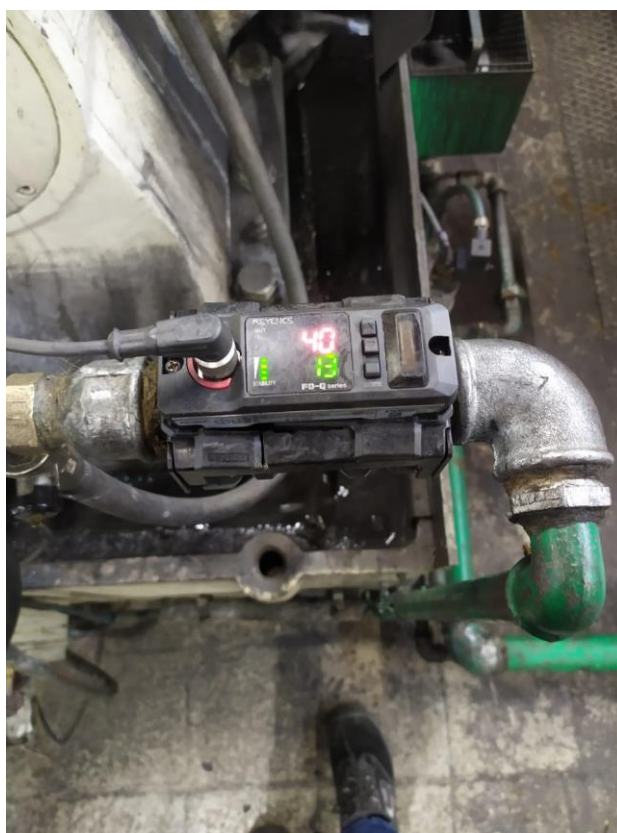


Figura 125 Flussostato in linea

4.8 INVERTER

Un inverter è un apparato elettronico di ingresso/uscita in grado di convertire una corrente continua in ingresso in una corrente alternata in uscita e di variarne i parametri di ampiezza e frequenza. È dunque il duale del raddrizzatore di corrente. Tale strumento viene dunque alimentato a tensione e frequenze costanti fissate dalla rete. In uscita invece fornirà la corrente alternata necessaria ad alimentare il motore elettrico responsabile della rotazione della mola. Agendo sulla frequenza di uscita è dunque possibile variare la velocità di rotazione del motore e seguendo a cascata i vari cinematismi anche la velocità di rotazione della mola. Si riportano di seguito le frequenze utilizzate nella campagna sperimentale associandole alla velocità di rotazione della mola.

- 62 Hz e 30 RPM
- 72,3 Hz e 35 RPM
- 82,6 Hz e 40 RPM



Figura 127 Inverter

5. METODOLOGIA: DESIGN OF ESXPERIMENT SFERE DIAMETRO 17.462

Nel presente lavoro di tesi si è deciso di sfruttare la tecnica del “Design of experiment”, abbreviato in “DOE” per pianificare la campagna sperimentale e successivamente analizzarne i risultati. Per dare continuità al lavoro di tesi precedente si è scelto di ottimizzare il processo seguendo la stessa linea guida ovvero quella di migliorare l’efficienza del processo e ridurre i tempi di produzioni. Per tale motivo, nella fase di ottimizzazione, si procederà con la massimizzazione delle risposte in simultanea. Si vuole dunque individuare il modo in cui i vari fattori interagiscono tra loro in modo da poter individuare il ciclo di lavoro ottimale ovvero il ciclo di lavoro che sfrutta la miglior combinazione dei fattori presi in esame.

5.1 INDIVIDUAZIONE DEI FATTORI

La scelta dei fattori e della loro regione di interesse, ovvero dei parametri di processo e del range entro cui farli variare, richiede un’ottima conoscenza del processo.

Le variabili prese in considerazione durante la realizzazione di una campagna sperimentale progettata attraverso la tecnica del DOE possono essere suddivise in tre categorie:

- **Controllabili:** pressione del gruppo di spinta, velocità di rotazione della mola, portata di lubro-refrigerante
- **Incontrollabili:** variabilità dovuta all’operatore, fattori ambientali, qualità lotto in ingresso
- **Risposte:** tasso di asportazione materiale, parametri di ovalità, ondulosità e rugosità della sfera.

Il processo di lappatura all’interno dell’azienda, per le variabili controllabili, prese in esame prevede dei valori di riferimento. Tali valori possono poi essere variati dall’operatore in modo da seguire il più possibile la road map. Per quanto riguarda le sfere di diametro pari 17,462 mm i valori di riferimento sono indicati nella seguente tabella:

Tabella 8 valori di riferimento parametri di processo

Parametro	Valore
Pressione del gruppo di spinta[BAR]	7
Velocità di rotazione della mola [RPM]	30
Portata di lubro-refrigerante [l/MIN]	Non misurata

Per l'esecuzione dei test della campagna sperimentale è stato deciso di far variare tali fattori tra due livelli. Si riporta il range di variazione dei tre fattori nella tabella seguente:

Tabella 9 Livelli fattori

Parametro	Range di variazione
Pressione del gruppo di spinta[BAR]	7-8
Velocità di rotazione della mola [RPM]	30-40
Portata di lubro-refrigerante [l/MIN]	25-35

Si sono scelti tali livelli basandosi sul lavoro di tesi precedente. In questo modo è possibile andare ad ottenere dei risultati confrontabili con quelli ottenuti precedentemente e inoltre si evita di utilizzare dei valori di pressione, velocità o portata che vadano a rovinare il lotto causando danni economici all'azienda.

5.2 SCELTA DEL PIANO SPERIMENTALE

La scelta del piano sperimentale rappresenta, dopo l'individuazione dei fattori, il secondo step della tecnica del DOE. Nei capitoli precedenti si sono ampiamente discussi i possibili piani sperimentali su cui basare la campagna di test. Il piano sperimentale più utilizzato è quello denominato full factorial in cui si vanno a realizzare 2^n test sperimentali. A seguito dell'esperienza maturata nel lavoro "Influenza dei parametri di processo nell'operazione di lappatura delle sfere per cuscinetti: Design of Experiment (DOE) e analisi statistica" si è deciso di optare per un piano sperimentale con un maggiore numero di test ovvero quello denominato central composite design. Quest'ultimo prevede un numero di prove pari a $2^n + 2*n + n_c$.

Si vuole ricordare che con n si indica il numero di fattori mentre con n_c lo star point ovvero l'origine di un sistema di tre assi cartesiani associati ai tre fattori sul quale è possibile realizzare un cubo codificando il livello più alto dei fattori con 1 e il livello più basso con -1. Tale punto corrisponde dunque al centro di tale cubo.

Avendo tre fattori un piano sperimentale del tipo central composite design comporta dunque un numero di 16 prove. Nella seguente tabella si riportano i fattori associati a tali prove:

Tabella 10 Elenco prove sperimentali

TEST	Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
1	7	30	20
2	8	30	20
3	7	30	35
4	8	30	35
5	7.5	30	27.5
6	7.5	35	27.5
7	7	35	27.5
8	8	35	27.5
9	7.5	35	20
10	7.5	35	35
11	7.5	35	27.5
12	7	40	20
13	8	40	20
14	7	40	35
15	8	40	35
16	7.5	40	27.5

5.3 PROVE SPERIMENTALI

Una volta individuata la serie di test si può dunque passare alla realizzazione vera e propria della campagna sperimentale.

Prima di avviare la macchina vengono prelevate 10 sfere dal caricatore e misurate al comparatore secondo la metodologia spiegata nel capitolo 4. In questo modo è possibile individuare la quantità di sovrametallo effettiva da asportare. Una volta effettuata tale misura vengono prelevate altre 20 sfere dal caricatore. Di queste 10 sfere sono misurate all' MWA per individuare i parametri di ovalità e ondulosità e le restanti 10 al rugosimetro per la misura di rugosità. Vengono inoltre prelevate altre tre sfere dal caricatore, le quali saranno sottoposte al decapaggio nitrico in modo da

poter verificare l'assenza di rigato nero o rigato lucido. Durante la realizzazione di tali prove viene avviata la macchina secondo i parametri di processo previsti dalla prova che si vuole effettuare.

Durante l'esecuzione della prova viene monitorato inoltre la temperatura del lubro-refrigerante mediante il termometro a mercurio descritto nel capitolo 4. Ad ogni intervallo di un'ora viene realizzata la misura di 10 sfere al comparatore in modo da accertarsi che la lavorazione stia procedendo secondo le indicazioni della road map. Ad ogni intervallo di due ore vengono invece ripetute le analisi all'MWA e al rugosimetro. La prima fase del processo di lappatura, come previsto dalla road map, ha una durata di 4-5 ore. Al termine delle 4 ore la prova sperimentale viene considerata terminata e vengono realizzate le prove al comparatore, al MWA e al rugosimetro. Inoltre, vengono prelevate altre tre sfere da sottoporre al decapaggio nitrico. In questo modo è possibile capire se la lavorazione ha prodotto delle sfere affette da rigato nero e/o rigato lucido oppure se questi erano presenti anche prima dell'inizio della lavorazione.

Si riporta uno schema riassuntivo delle analisi che sono state effettuate durante la realizzazione di una prova.

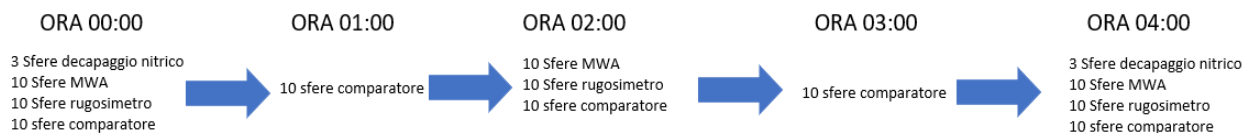


Figura 128 Schema realizzazione analisi di un test sperimentale

5.3.1 ACQUISIZIONE DEI DATI

I risultati delle prove sperimentali verranno riportati nel seguente capitolo. Questi verranno organizzati in 5 tabelle per ogni prova sperimentale.

- Tabella 1: relativa al valore di pressione, velocità e portata del test
- Tabella 2: relativa alla tracciabilità del lotto testato
- Tabella 3: relativa al CUT RATE, la temperatura del lubro-refrigerante e la presenza di rigato nero o rigato lucido
- Tabella 4: relativa ai dati acquisiti attraverso l'MWA
- Tabella 5: relativa alla rugosità

Nelle tabelle 4 e 5 vengono inoltre calcolate le variazioni percentuali delle risposte calcolandole rispetto alle risposte all'ora 00:00 del lotto in esame.

Si riporta inoltre una tabella riassuntiva finale in cui si riportano le 4 risposte studiate calcolate come variazione percentuale rispetto alle risposte relative all'ora 00:00 della totalità dei lotti testati.

Le variazioni percentuali delle risposte calcolate tra l'ora 00:00 e l'ora 04:00 sono state calcolate nel seguente modo. Si riporta per completezza anche il calcolo del CUT RATE:

$$VD_w[\%] = \frac{VD_{w0} - VD_{w4}}{VD_{w0}} * 100 \quad (1)$$

$$M1[\%] = \frac{M1_0 - M1_4}{M1_0} * 100 \quad (2)$$

$$Ra[\%] = \frac{Ra_0 - Ra_4}{Ra_0} * 100 \quad (3)$$

$$Cut Rate = Dws_0 - Dws_4 \quad (4)$$

6. TEST SU SFERE DIAMETRO 17.462

Nel seguente capitolo si riportano la totalità dei dati acquisiti durante la campagna sperimentale. Si eviterà però di riportare i dati relativi ai test che non sono stati ritenuti attendibili come, ad esempio, i test che sono stati interrotti prima delle 4 ore al fine di evitare di compromettere il lotto oppure i test che hanno visto il cambio dei parametri di prova al fine sempre di evitare il danneggiamento il lotto.

Come detto al termine del capitolo precedente si riporteranno cinque tabelle per ogni test:

- Tabella 1: relativa al valore di pressione, velocità e portata del test
- Tabella 2: relativa alla tracciabilità del lotto testato
- Tabella 3: relativa al CUT RATE, la temperatura del lubro-refrigerante e la presenza di rigato nero o rigato lucido
- Tabella 4: relativa ai dati acquisiti attraverso l'MWA
- Tabella 5: relativa alla rugosità

Nelle tabelle 4 e 5 vengono inoltre calcolate le variazioni percentuali delle risposte calcolandole rispetto alle risposte all'ora 00:00 del lotto in esame.

Si riporta inoltre una tabella riassuntiva finale in cui si riportano le 4 risposte studiate calcolate come variazione percentuale rispetto alle risposte relative all'ora 00:00 della totalità dei lotti testati. I test non saranno riportati nell'ordine in cui sono stati eseguiti bensì nell'ordine definito da Rstudio nella realizzazione del piano sperimentale

6.1 TEST 1

Tabella 11 Parametri TEST 1

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
7	30	20

Tabella 12 Tracciabilità TEST 1

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
18/02/2022	75	02864ZN	PREFINITURA	10,3	4

Tabella 13 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 1

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	10,861	NO DIFETTI	26,5
01:00	9,187		
02:00	8,39		
03:00	7,301		
04:00	6,27	NO DIFETTI	
CUT RATE	4,591		

Tabella 14 Dati MWA TEST 1

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	1,509	0,209	0,203	86,54738	MAX	0,13
	MED	0,462	0,1425	0,141	69,48052	MED	
	MED+3S	1,619	0,253	0,223	86,22607	X+3S	
VDw	MAX	1,836	0,343	0,3325	81,88998	MAX	0,13
	MED	0,648	0,23	0,239	63,11728	MED	N/A
	MED+3S	2,2785	0,4445	0,3815	83,25653	X+3S	/
L	MAX	23,99	10,243	9,709	59,52897	MAX	5,4
	MED	12,69	6,1285	7,016	44,71237	MED	3,4
	MED+3S	30,015	13,0645	12,875	57,10478	X+3S	7,1
M	MAX	31,88	10,76	13,635	57,23024	MAX	7,1
	MED	18,8	7,5705	9,078	51,71277	MED	5,3
	MED+3S	34,76	13,02	16,195	53,40909	X+3S	9,5
M1	MAX	16,49	9,0875	10,118	38,6416	MAX	3,8
	MED	11,09	5,0565	6,481	41,55996	MED	2,5
	MED+3S	21,535	11,078	12,95	39,86534	X+3S	5
H	MAX	260,6	30,235	38,095	85,38181	MAX	16,5
	MED	104,72	15,96	16,73	84,02406	MED	15,5
	MED+3S	271,6	32,62	40,11	85,23196	X+3S	22

Tabella 15 Dati Rugosimetro TEST 1

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,0494	0,0143	0,0096
2	0,0447	0,0086	0,0097
3	0,0568	0,0119	0,0133
4	0,0552	0,0126	0,0119
5	0,0531	0,0101	0,0104
6	0,0610	0,0111	0,0103
7	0,0563	0,0122	0,0127
8	0,0489	0,0095	0,0095
9	0,0617	0,0128	0,0112
10	0,0601	0,0096	0,0092
AVG [μm]	0,0547	0,0112	0,0108
Ra [%]	80,34555261		

Tabella 16 Risposte percentuali TEST 1

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
4,591	71,267	74,228	89,864

6.2 TEST 2

Tabella 17 Parametri TEST 2

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
8	30	20

Tabella 18 Tracciabilità TEST 2

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
21/02/2022	75	02882ZN	PREFINITURA	10	4

Tabella 19 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 2

TIME	Dws (x) [µm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [°C]
00:00	9,991	R.NERO 1	25
01:00	8,567		
02:00	7,789		
03:00	6,716		
04:00	5,633	TRACCE DI R.NERO	
CUT RATE	4,358		

Tabella 20 Dati MWA TEST 2

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	1,103	0,354	0,242	78,05984	MAX	0,13
	MED	0,915	0,305	0,176	80,76503	MED	
	MED+3S	1,274	0,437	0,265	79,19937	X+3S	
VDw	MAX	1,615	0,556	0,442	72,63158	MAX	0,13
	MED	1,208	0,392	0,279	76,90397	MED	N/A
	MED+3S	1,934	0,68	0,485	74,92244	X+3S	/
L	MAX	46,09	16,17	10,74	76,69777	MAX	5,4
	MED	30,23	12,48	7,613	74,81641	MED	3,4
	MED+3S	57,86	21,39	12,93	77,65296	X+3S	7,1
M	MAX	60,51	16,62	14,45	76,11965	MAX	7,1
	MED	30,23	13,23	10,45	65,43169	MED	5,3
	MED+3S	57,86	20,59	18,53	67,97442	X+3S	9,5
M1	MAX	45,45	15,05	11,73	74,19142	MAX	3,8
	MED	32,75	10,36	7,388	77,44122	MED	2,5
	MED+3S	54,47	18,59	15,89	70,82798	X+3S	5
H	MAX	284,2	23,36	20,56	92,76566	MAX	16,5
	MED	260,6	21,36	16,56	93,64543	MED	15,5
	MED+3S	315,8	25,35	22,2	92,97023	X+3S	22

Tabella 21 Dati Rugosimetro TEST 2

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,1166	0,0095	0,0107
2	0,1129	0,0134	0,0118
3	0,1243	0,0104	0,0117
4	0,1224	0,0126	0,0142
5	0,1087	0,01	0,0122
6	0,1206	0,0144	0,0121
7	0,1519	0,0205	0,013
8	0,1306	0,0149	0,0119
9	0,1072	0,0127	0,0144
10	0,126	0,0146	0,0158
AVG [μm]	0,12212	0,0133	0,01278
Ra [%]	89,53488372		

Tabella 22 Risposte percentuali TEST 2

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
4,358	66,458	70,622	87,949

6.3 TEST 3

Tabella 23 Parametri TEST 3

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
7	40	20

Tabella 24 Tracciabilità TEST 3

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
15/03/2022	75	04234ZN	PREFINITURA	12	6

Tabella 25 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 3

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	12,625	NO DIFETTI	27
01:00	10,788		
02:00	9,628		
03:00	8,603		
04:00	7,519	NO DIFETTI	
CUT RATE	5,106		

Tabella 26 Dati MWA TEST 3

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	2,042	0,32	0,226	2,042	MAX	0,13
	MED	1	0,192	0,172	1	MED	
	MED+3S	2,166	0,369	0,273	2,166	X+3S	
VDw	MAX	2,694	0,423	0,41	2,694	MAX	0,13
	MED	1,43	0,274	0,303	1,43	MED	N/A
	MED+3S	3,054	0,512	0,513	3,054	X+3S	/
L	MAX	54,5	10,13	9,997	54,5	MAX	5,4
	MED	33,34	7,088	7	33,34	MED	3,4
	MED+3S	64,1	12,47	11,96	64,1	X+3S	7,1
M	MAX	43,8	10,7	16,99	43,8	MAX	7,1
	MED	35,11	8,776	10,83	35,11	MED	5,3
	MED+3S	51,7	14,08	22,26	51,7	X+3S	9,5
M1	MAX	33,35	8,805	13,65	33,35	MAX	3,8
	MED	24,56	6,411	7,988	24,56	MED	2,5
	MED+3S	43,16	11,85	19,03	43,16	X+3S	5
H	MAX	261,8	45,46	17,13	261,8	MAX	16,5
	MED	193,3	18,39	14,72	193,3	MED	15,5
	MED+3S	272,9	47,76	17,99	272,9	X+3S	22

Tabella 27 Dati Rugosimetro TEST 3

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,1122	0,0126	0,015
2	0,134	0,0128	0,012
3	0,1094	0,0137	0,0149
4	0,1464	0,0138	0,0127
5	0,1288	0,0101	0,0112
6	0,1128	0,0121	0,0113
7	0,1304	0,0103	0,0112
8	0,0968	0,0105	0,0116
9	0,0847	0,012	0,0143
10	0,128	0,0117	0,0156
AVG [μm]	0,11835	0,01196	0,01298
Ra [%]	89,03253063		

Tabella 28 Risposte percentuali TEST 3

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
5,106	63,572	68,236	87,761

6.4 TEST 4

Tabella 29 Parametri TEST 4

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
8	40	20

Tabella 30 Tracciabilità TEST 4

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
16/03/2022	75	46972ZT	PREFINITURA	0	-7

Tabella 31 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 4

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	0,555		
01:00	-1,079		
02:00	-2,707		
03:00	-3,764		
04:00	-5,005		
CUT RATE	5,560		

Tabella 32 Dati MWA TEST 4

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	0,958	0,389	0,375	60,85595	MAX	0,13
	MED	0,698	0,214	0,242	65,32951	MED	
	MED+3S	1,214	0,469	0,465	61,69687	X+3S	
VDw	MAX	1,313	0,742	0,649	50,57121	MAX	0,13
	MED	0,981	0,361	0,385	60,75433	MED	N/A
	MED+3S	1,683	0,893	0,784	53,41652	X+3S	/
L	MAX	30,38	18,82	12,11	60,13825	MAX	5,4
	MED	18,37	13,55	8,548	53,46761	MED	3,4
	MED+3S	41,6	23,53	16,75	59,73558	X+3S	7,1
M	MAX	48,07	18,82	17,06	64,51009	MAX	7,1
	MED	34,79	13,55	12,71	63,46651	MED	5,3
	MED+3S	65,24	23,53	23,2	64,43899	X+3S	9,5
M1	MAX	37,46	16,47	12,8	65,83022	MAX	3,8
	MED	22,66	10,84	8,123	64,15269	MED	2,5
	MED+3S	49,14	20,72	18,24	62,88156	X+3S	5
H	MAX	234,4	28,02	47,54	79,71843	MAX	16,5
	MED	203,8	20,88	23,52	88,45927	MED	15,5
	MED+3S	273,3	32,85	53,01	80,60373	X+3S	22

Tabella 33 Dati Rugosimetro TEST 4

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,1137	0,0106	0,0124
2	0,0979	0,0155	0,0119
3	0,0878	0,0145	0,0105
4	0,1325	0,0121	0,0119
5	0,1234	0,0174	0,0099
6	0,1113	0,0152	0,013
7	0,117	0,0088	0,0085
8	0,1244	0,0145	0,0158
9	0,0978	0,0143	0,0129
10	0,0917	0,0151	0,0109
AVG [μm]	0,10975	0,0138	0,01177
Ra [%]	89,27562642		

Tabella 34 Risposte percentuali TEST 4

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
5,56	53,714	67,699	88,902

6.5 TEST 5

Tabella 35 Parametri TEST 5

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
7	30	35

Tabella 36 Tracciabilità TEST 5

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
22/02/2022	75	00558XN	PREFINITURA	4	-2

Tabella 37 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 5

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	4,216	NO DIFETTI	26
01:00	2,524		
02:00	1,47		
03:00	0,487		
04:00	-0,567	NO DIFETTI	
CUT RATE	4,783		

Tabella 38 Dati MWA TEST 2

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	1,376	1,491	0,194	85,90116	MAX	0,13
	MED	1,083	0,475	0,151	86,05725	MED	
	MED+3S	1,835	1,776	0,232	87,35695	X+3S	
VDw	MAX	2,168	1,661	0,313	85,56273	MAX	0,13
	MED	1,544	0,556	0,248	83,93782	MED	N/A
	MED+3S	2,819	1,906	0,395	85,98794	X+3S	/
L	MAX	54,2	12,43	10,49	80,64576	MAX	5,4
	MED	34,52	9,894	6,554	81,0139	MED	3,4
	MED+3S	75,59	15,94	13,3	82,40508	X+3S	7,1
M	MAX	76,9	28,31	10,88	85,85176	MAX	7,1
	MED	56,44	14,59	7,724	86,31467	MED	5,3
	MED+3S	92,16	35,82	13,25	85,62283	X+3S	9,5
M1	MAX	58,13	12,33	10,21	82,43592	MAX	3,8
	MED	40,12	8,525	5,643	85,9347	MED	2,5
	MED+3S	75,07	16,5	12,39	83,4954	X+3S	5
H	MAX	279,9	292,5	16,86	93,97642	MAX	16,5
	MED	245,1	76,87	13,35	94,55324	MED	15,5
	MED+3S	294,8	365,5	18,19	93,82972	X+3S	22

Tabella 39 Dati Rugosimetro TEST5

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,1411	0,009	0,0147
2	0,1507	0,0079	0,0135
3	0,105	0,0111	0,007
4	0,1537	0,0127	0,0088
5	0,1236	0,0105	0,0089
6	0,1114	0,0112	0,0125
7	0,1322	0,0124	0,01
8	0,1837	0,0137	0,0148
9	0,1434	0,0121	0,0133
10	0,1199	0,0145	0,0128
AVG [μm]	0,13647	0,01151	0,01163
Ra [%]	91,47798051		

Tabella 40 Risposte percentuali TEST 5

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
4,783	70,185	77,561	89,034

6.6 TEST 6

Tabella 41 Parametri TEST 6

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
8	30	35

Tabella 42 Tracciabilità TEST 6

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
23/02/2022	75	02867ZN	PREFINITURA	11	4

Tabella 43 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 6

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	11,213	NO DIFETTI	26,5
01:00	9,506		
02:00	8,679		
03:00	7,569		
04:00	6,609	NO DIFETTI	
CUT RATE	4,604		

Tabella 44 Dati MWA TEST 6

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	0,827	0,274	0,175	78,83918	MAX	0,13
	MED	0,651	0,177	0,146	77,57296	MED	
	MED+3S	1,077	0,32	0,215	80,03714	X+3S	
VDw	MAX	1,508	0,467	0,318	78,91247	MAX	0,13
	MED	1,084	0,289	0,257	76,29151	MED	N/A
	MED+3S	1,963	0,536	0,413	78,96077	X+3S	/
L	MAX	32,58	12,2	11,71	64,0577	MAX	5,4
	MED	22,66	6,962	5,876	74,06884	MED	3,4
	MED+3S	42,26	14,09	13,29	68,55182	X+3S	7,1
M	MAX	30,58	13,94	14,82	51,53695	MAX	7,1
	MED	24,84	8,7	10,06	59,50081	MED	5,3
	MED+3S	34,86	15,96	16,77	51,89329	X+3S	9,5
M1	MAX	22,51	12,31	12,15	46,02399	MAX	3,8
	MED	17,23	6,455	7,459	56,70923	MED	2,5
	MED+3S	29,46	15,29	14,66	50,23761	X+3S	5
H	MAX	153,5	27,95	15,55	89,86971	MAX	16,5
	MED	137,9	16,06	13,83	89,97099	MED	15,5
	MED+3S	163,4	30,18	16,77	89,73684	X+3S	22

Tabella 45 Dati Rugosimetro TEST 6

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,0716	0,0138	0,0146
2	0,0821	0,0116	0,0101
3	0,0827	0,015	0,0131
4	0,0799	0,0086	0,0084
5	0,0766	0,0128	0,0119
6	0,079	0,0086	0,0142
7	0,0733	0,0099	0,0077
8	0,088	0,0127	0,0136
9	0,0682	0,0116	0,0125
10	0,0926	0,013	0,0105
AVG [μm]	0,0794	0,01176	0,01166
Ra [%]	85,31486146		

Tabella 46 Risposte percentuali TEST 6

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
4,604	74,725	88,930	36,171

6.7 TEST 7

Tabella 47 Parametri TEST 7

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
7	40	35

Tabella 48 Tracciabilità TEST 7

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
21/03/2022	75	05057ZN	PREFINITURA	2	-6

Tabella 49 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 7

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	1,505	NO DIFETTI	27
01:00	-0,471		
02:00	-1,768		
03:00	-3,174		
04:00	-4,444	NO DIFETTI	
CUT RATE	5,949		

Tabella 50 Dati MWA TEST 7

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	1,523	0,293	0,184	87,91858	MAX	0,13
	MED	1,064	0,194	0,128	87,96992	MED	
	MED+3S	1,929	0,313	0,248	87,1436	X+3S	
VDw	MAX	2,486	0,555	0,35	85,92116	MAX	0,13
	MED	1,601	0,305	0,225	85,94628	MED	N/A
	MED+3S	3,147	0,632	0,457	85,47823	X+3S	/
L	MAX	48,65	11,11	7,585	84,40904	MAX	5,4
	MED	30,44	7,988	5,374	82,3456	MED	3,4
	MED+3S	70,29	14,2	10,1	85,63096	X+3S	7,1
M	MAX	80,38	13,39	12,38	84,59816	MAX	7,1
	MED	52,98	9,236	8,002	84,89619	MED	5,3
	MED+3S	91,8	14,92	15,16	83,48584	X+3S	9,5
M1	MAX	39,06	11,13	10,96	71,9406	MAX	3,8
	MED	29,31	6,497	5,589	80,93142	MED	2,5
	MED+3S	47,92	13,38	14,53	69,67863	X+3S	5
H	MAX	337,4	18,29	14,01	95,84766	MAX	16,5
	MED	292,5	15,16	12,74	95,64444	MED	15,5
	MED+3S	365,1	20,3	15,81	95,66968	X+3S	22

Tabella 51 Dati Rugosimetro TEST 7

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,1353	0,0114	0,0126
2	0,1356	0,0117	0,0081
3	0,1318	0,0107	0,0138
4	0,1516	0,0096	0,008
5	0,1255	0,0075	0,0066
6	0,1321	0,0142	0,0135
7	0,1455	0,01	0,0076
8	0,0965	0,0089	0,011
9	0,1237	0,0116	0,0138
10	0,1138	0,0094	0,0127
AVG [μm]	0,12914	0,0105	0,01077
Ra [%]	91,66021372		

Tabella 52 Risposte percentuali TEST 7

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
5,949	72,950	77,775	89,845

6.8 TEST 8

Tabella 53 Parametri TEST 8

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
8	40	35

Tabella 54 Tracciabilità TEST 8

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
22/03/2022	75	05062ZN	PREFINITURA	7	0

Tabella 55 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 8

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	7,561	R.NERO 1	27,5
01:00	5,771		
02:00	4,62		
03:00	3,064		
04:00	1,873	NO DIFETTI	
CUT RATE	5,688		

Tabella 56 Dati MWA TEST 8

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	1,043	0,229	0,236	77,37296	MAX	0,13
	MED	0,77	0,18	0,171	77,79221	MED	
	MED+3S	1,153	0,301	0,304	73,634	X+3S	
VDw	MAX	1,97	0,409	0,451	77,1066	MAX	0,13
	MED	1,315	0,309	0,304	76,88213	MED	N/A
	MED+3S	2,125	0,548	0,585	72,47059	X+3S	/
L	MAX	42,56	9,917	12,09	71,59305	MAX	5,4
	MED	31,08	7,359	6,947	77,64801	MED	3,4
	MED+3S	50,11	12,44	15,91	68,24985	X+3S	7,1
M	MAX	46,17	20,12	12,32	73,31601	MAX	7,1
	MED	32,89	10,34	9,968	69,69292	MED	5,3
	MED+3S	53,94	22,21	16,7	69,03967	X+3S	9,5
M1	MAX	39,05	17,67	9,873	74,71703	MAX	3,8
	MED	23,74	7,176	6,717	71,70598	MED	2,5
	MED+3S	49,96	20,02	14,06	71,85749	X+3S	5
H	MAX	158,6	20,85	21,19	86,63934	MAX	16,5
	MED	139,9	15,19	14,4	89,70693	MED	15,5
	MED+3S	169,1	23,81	22,58	86,64695	X+3S	22

Tabella 57 Dati Rugosimetro TEST 8

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,0806	0,011	0,014
2	0,1027	0,0149	0,0133
3	0,0949	0,0102	0,0111
4	0,0967	0,0081	0,0133
5	0,0817	0,0096	0,0108
6	0,1055	0,0081	0,0095
7	0,083	0,0089	0,0135
8	0,0944	0,0115	0,0119
9	0,0983	0,013	0,0139
10	0,0895	0,013	0,0094
AVG [μm]	0,09273	0,01083	0,01207
Ra [%]	86,98371617		

Tabella 58 Risposte percentuali TEST 8

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
5,688	63,452	73,290	88,619

6.9 TEST 9

Tabella 59 Parametri TEST 9

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
7,5	35	27,5

Tabella 60 Tracciabilità TEST 9

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
28/02/2022	75	00566ZW	PREFINITURA	8	2

Tabella 61 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 9

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	9,14	TRACCE DI R.NERO	26
01:00	7,336		
02:00	6,442		
03:00	5,226		
04:00	4,043	NO DIFETTI	
CUT RATE	5,097		

Tabella 62 Dati MWA TEST 9

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	1,309	0,206	0,234	82,12376	MAX	0,13
	MED	0,724	0,172	0,188	74,03315	MED	
	MED+3S	1,674	0,254	0,275	83,57228	X+3S	
VDw	MAX	2,019	0,348	0,418	79,29668	MAX	0,13
	MED	1,03	0,284	0,324	68,54369	MED	N/A
	MED+3S	2,259	0,441	0,5	77,86631	X+3S	/
L	MAX	61,44	8,817	10,33	83,18685	MAX	5,4
	MED	26,79	7,094	7,932	70,39194	MED	3,4
	MED+3S	69,64	11,66	12,51	82,03619	X+3S	7,1
M	MAX	32,01	18,32	16,66	47,95376	MAX	7,1
	MED	25,47	11,01	11,67	54,18139	MED	5,3
	MED+3S	37,27	23,63	20,58	44,78133	X+3S	9,5
M1	MAX	21,99	13,75	14,2	35,42519	MAX	3,8
	MED	15,81	8,213	7,978	49,53827	MED	2,5
	MED+3S	28,34	18,92	17,3	38,95554	X+3S	5
H	MAX	237,7	23,4	16,46	93,07531	MAX	16,5
	MED	145,7	16,53	15,03	89,68428	MED	15,5
	MED+3S	245,1	24,45	18,2	92,57446	X+3S	22

Tabella 63 Dati Rugosimetro TEST 9

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,0675	0,0104	0,0113
2	0,0968	0,0134	0,0123
3	0,0719	0,0072	0,0108
4	0,0936	0,0154	0,0109
5	0,0918	0,0121	0,0109
6	0,1	0,0113	0,0114
7	0,0924	0,011	0,0122
8	0,0899	0,0137	0,0132
9	0,0733	0,0099	0,0087
10	0,0693	0,0136	0,0092
AVG [μm]	0,08465	0,0118	0,01109
Ra [%]	86,89899587		

Tabella 64 Risposte percentuali TEST 9

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
5,097	68,544	49,538	86,899

6.10 TEST 10

Tabella 65 Parametri TEST 10

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
7	35	27,5

Tabella 66 Tracciabilità TEST 10

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
01/03/2022	75	04177ZN	PREFINITURA	13	6

Tabella 67 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 10

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	13,37	R.NERO 1	24,5
01:00	11,697		
02:00	10,895		
03:00	9,786		
04:00	8,783	NO DIFETTI	
CUT RATE	4,587		

Tabella 68 Dati MWA TEST 10

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	0,784	0,215	0,16	79,59184	MAX	0,13
	MED	0,549	0,154	0,134	75,59199	MED	
	MED+3S	0,986	0,264	0,178	81,94726	X+3S	
VDw	MAX	1,387	0,369	0,253	81,75919	MAX	0,13
	MED	0,882	0,247	0,22	75,05669	MED	N/A
	MED+3S	1,737	0,422	0,298	82,84398	X+3S	/
L	MAX	32,13	9,999	6,073	81,09866	MAX	5,4
	MED	22,15	6,261	4,696	78,7991	MED	3,4
	MED+3S	38,99	11,57	8,133	79,14081	X+3S	7,1
M	MAX	30,22	11,91	13,03	56,88286	MAX	7,1
	MED	23,71	8,336	9,697	59,10164	MED	5,3
	MED+3S	32,95	15,7	16,43	50,13657	X+3S	9,5
M1	MAX	23,83	9,971	10,98	53,92363	MAX	3,8
	MED	16,25	5,363	7,005	56,89231	MED	2,5
	MED+3S	30,09	11,62	14,9	50,48189	X+3S	5
H	MAX	119,1	29,26	18,25	84,67674	MAX	16,5
	MED	101,8	16,27	14,43	85,82515	MED	15,5
	MED+3S	129,8	30,9	19,35	85,09245	X+3S	22

Tabella 69 Dati Rugosimetro TEST 10

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,076	0,0129	0,0134
2	0,0704	0,0109	0,0122
3	0,0677	0,0086	0,0086
4	0,0636	0,0118	0,011
5	0,0645	0,0107	0,0133
6	0,0759	0,0076	0,0109
7	0,0703	0,0086	0,0102
8	0,0725	0,0086	0,0129
9	0,055	0,0149	0,0118
10	0,0568	0,0126	0,0129
AVG [μm]	0,06727	0,01072	0,01172
Ra [%]	82,57767207		

Tabella 70 Risposte percentuali TEST 10

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
4,587	<u>73,551</u>	72,145	88,949

6.11 TEST 11

Tabella 71 Parametri TEST 11

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
8	35	27,5

Tabella 72 Tracciabilità TEST 11

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
02/03/2022	75	04167ZN	PREFINITURA	10	4

Tabella 73 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 11

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	10,761	R.NERO 1	25
01:00	8,871		
02:00	7,64		
03:00	6,649		
04:00	5,401	R.NERO 1	
CUT RATE	5,36		

Tabella 74 Dati MWA TEST 11

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	1,062	0,267	0,22	79,28437	MAX	0,13
	MED	0,842	0,183	0,162	80,7601	MED	
	MED+3S	1,225	0,363	0,256	79,10204	X+3S	
VDw	MAX	1,439	0,37	0,371	74,21821	MAX	0,13
	MED	1,136	0,279	0,259	77,2007	MED	N/A
	MED+3S	1,911	0,588	0,439	77,02773	X+3S	/
L	MAX	33,45	11,16	8,348	75,04335	MAX	5,4
	MED	24,7	6,812	5,316	78,47773	MED	3,4
	MED+3S	46,82	15,25	9,571	79,55788	X+3S	7,1
M	MAX	66,34	17,05	14,63	77,94694	MAX	7,1
	MED	44,82	10,61	9,998	77,69299	MED	5,3
	MED+3S	73,33	21,25	18,18	75,20796	X+3S	9,5
M1	MAX	40,81	14,27	11,74	71,23254	MAX	3,8
	MED	28,37	7,437	7,13	74,86782	MED	2,5
	MED+3S	52,99	18,75	16,12	69,57917	X+3S	5
H	MAX	244,4	48,78	42,62	82,56137	MAX	16,5
	MED	223,6	21,74	21,17	90,5322	MED	15,5
	MED+3S	272,2	51,2	50,91	81,29684	X+3S	22

Tabella 75 Dati Rugosimetro TEST 11

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,114	0,0152	0,0092
2	0,111	0,0134	0,0111
3	0,1067	0,0085	0,0108
4	0,1211	0,0151	0,0117
5	0,117	0,0114	0,0125
6	0,1173	0,0092	0,0129
7	0,1214	0,0136	0,0142
8	0,1047	0,008	0,0148
9	0,1125	0,0106	0,0132
10	0,1153	0,0075	0,0082
AVG [μm]	0,1141	0,01125	0,01186
Ra [%]	89,60560911		

Tabella 76 Risposte percentuali TEST 11

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
5,36	68,862	71,648	88,817

6.12 TEST 12

Tabella 77 Parametri TEST 12

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
7,5	30	27,5

Tabella 78 Tracciabilità TEST 12

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
24/02/2022	75	04755ZN	PREFINITURA	8,5	2

Tabella 79 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 12

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	8,822	NO DIFETTI	26,5
01:00	7,459		
02:00	6,494		
03:00	5,377		
04:00	4,446	NO DIFETTI	
CUT RATE	4,376		

Tabella 80 Dati MWA TEST 12

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	0,827	0,274	0,175	78,83918	MAX	0,13
	MED	0,651	0,177	0,146	77,57296	MED	
	MED+3S	1,077	0,32	0,215	80,03714	X+3S	
VDw	MAX	1,508	0,467	0,318	78,91247	MAX	0,13
	MED	1,084	0,289	0,257	76,29151	MED	N/A
	MED+3S	1,963	0,536	0,413	78,96077	X+3S	/
L	MAX	32,58	12,2	11,71	64,0577	MAX	5,4
	MED	22,66	6,962	5,876	74,06884	MED	3,4
	MED+3S	42,26	14,09	13,29	68,55182	X+3S	7,1
M	MAX	30,58	13,94	14,82	51,53695	MAX	7,1
	MED	24,84	8,7	10,06	59,50081	MED	5,3
	MED+3S	34,86	15,96	16,77	51,89329	X+3S	9,5
M1	MAX	22,51	12,31	12,15	46,02399	MAX	3,8
	MED	17,23	6,455	7,459	56,70923	MED	2,5
	MED+3S	29,46	15,29	14,66	50,23761	X+3S	5
H	MAX	153,5	27,95	15,55	89,86971	MAX	16,5
	MED	137,9	16,06	13,83	89,97099	MED	15,5
	MED+3S	163,4	30,18	16,77	89,73684	X+3S	22

Tabella 81 Dati Rugosimetro TEST 12

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,0716	0,0138	0,0146
2	0,0821	0,0116	0,0101
3	0,0827	0,015	0,0131
4	0,0799	0,0086	0,0084
5	0,0766	0,0128	0,0119
6	0,079	0,0086	0,0142
7	0,0733	0,0099	0,0077
8	0,088	0,0127	0,0136
9	0,0682	0,0116	0,0125
10	0,0926	0,013	0,0105
AVG [μm]	0,0794	0,01176	0,01166
Ra [%]	85,31486146		

Tabella 82 Risposte percentuali TEST 12

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
4,376	69,103	70,339	89,005

6.13 TEST 13

Tabella 83 Parametri TEST 13

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
7,5	40	27,5

Tabella 84 Tracciabilità TEST 13

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
23/03/2022	75	05060ZN	PREFINITURA	13	6

Tabella 85 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 13

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	13,195	NO DIFETTI	27
01:00	11,108		
02:00	9,917		
03:00	8,422		
04:00	7,338	NO DIFETTI	
CUT RATE	5,857		

Tabella 86 Dati MWA TEST 13

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	1,234	0,25	0,259	79,01135	MAX	0,13
	MED	0,944	0,19	0,163	82,73305	MED	
	MED+3S	1,436	0,293	0,333	76,81058	X+3S	
VDw	MAX	2,068	0,464	0,482	76,69246	MAX	0,13
	MED	1,524	0,329	0,288	81,10236	MED	N/A
	MED+3S	2,553	0,569	0,611	76,06737	X+3S	/
L	MAX	48,18	9,823	10,5	78,20672	MAX	5,4
	MED	36,08	6,811	6,159	82,9296	MED	3,4
	MED+3S	58,69	11,78	13,88	76,35032	X+3S	7,1
M	MAX	47,08	17,56	16,7	64,52846	MAX	7,1
	MED	35,64	13,12	9,852	72,3569	MED	5,3
	MED+3S	51,95	23,89	20,08	61,34745	X+3S	9,5
M1	MAX	38,11	15,24	10,01	73,73393	MAX	3,8
	MED	21,88	10,15	7,165	67,2532	MED	2,5
	MED+3S	45,92	19,32	13,96	69,5993	X+3S	5
H	MAX	229,2	20,1	18,9	91,75393	MAX	16,5
	MED	202	16,22	14,52	92,81188	MED	15,5
	MED+3S	242,5	22,78	23,62	90,25979	X+3S	22

Tabella 87 Dati Rugosimetro TEST 13

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,1105	0,013	0,0107
2	0,1113	0,0092	0,0123
3	0,093	0,0144	0,0081
4	0,1106	0,015	0,011
5	0,0812	0,0145	0,0114
6	0,1059	0,014	0,0109
7	0,1063	0,014	0,0137
8	0,1016	0,0079	0,0088
9	0,0919	0,0081	0,0134
10	0,1143	0,0124	0,0119
AVG [μm]	0,10266	0,01225	0,01122
Ra [%]	89,07071888		

Tabella 88 Risposte percentuali TEST 13

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
5,857	65,376	71,509	89,420

6.14 TEST 14

Tabella 89 Parametri TEST 14

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
7,5	35	20

Tabella 90 Tracciabilità TEST 14

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
03/03/2022	75	04191ZN	PREFINITURA	6	0

Tabella 91 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 14

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	6,783	NO DIFETTI	25
01:00	5,22		
02:00	4,081		
03:00	2,976		
04:00	1,827	NO DIFETTI	
CUT RATE	4,956		

Tabella 92 Dati MWA TEST 14

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	0,926	0,386	0,258	72,13823	MAX	0,13
	MED	0,678	0,196	0,179	73,59882	MED	
	MED+3S	1,035	0,431	0,325	68,59903	X+3S	
VDw	MAX	1,505	0,421	0,5	66,77741	MAX	0,13
	MED	1,104	0,305	0,291	73,6413	MED	N/A
	MED+3S	1,772	0,537	0,606	65,80135	X+3S	/
L	MAX	36,53	9,852	9,422	74,2075	MAX	5,4
	MED	22,08	6,626	6,517	70,4846	MED	3,4
	MED+3S	44,32	13,27	12,95	70,78069	X+3S	7,1
M	MAX	43,52	15,15	17,18	60,5239	MAX	7,1
	MED	34,59	10,17	10,67	69,15293	MED	5,3
	MED+3S	55,1	19,24	19,87	63,93829	X+3S	9,5
M1	MAX	34,26	11,74	14,5	57,67659	MAX	3,8
	MED	23,62	6,922	7,313	69,03895	MED	2,5
	MED+3S	47,36	16,22	17,03	64,04139	X+3S	5
H	MAX	199,1	79,16	30,58	84,64088	MAX	16,5
	MED	183,5	26,06	21,02	88,54496	MED	15,5
	MED+3S	217,9	85,23	37,34	82,8637	X+3S	22

Tabella 93 Dati Rugosimetro TEST 14

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,1173	0,0106	0,0085
2	0,0882	0,0123	0,0154
3	0,0967	0,0111	0,0138
4	0,1021	0,0171	0,0109
5	0,1073	0,0088	0,0136
6	0,0802	0,0107	0,0083
7	0,0944	0,0088	0,0168
8	0,0954	0,0081	0,0103
9	0,0831	0,013	0,0116
10	0,0972	0,0125	0,0155
AVG [μm]	0,09619	0,0113	0,01247
Ra [%]	87,03607444		

Tabella 94 Risposte percentuali TEST 14

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
4,956	65,015	70,920	88,242

6.15 TEST 15

Tabella 95 Parametri TEST 15

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
7,5	35	35

Tabella 96 Tracciabilità TEST 15

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
09/03/2022	75	04215ZN	PREFINITURA	5,5	-2

Tabella 97 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 15

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	5,304	NO DIFETTI	
01:00	3,419		
02:00	2,509		
03:00	1,322		
04:00	0,441	NO DIFETTI	
CUT RATE	4,863		

Tabella 98 Dati MWA TEST 15

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	1,255	0,497	0,386	69,24303	MAX	0,13
	MED	0,962	0,291	0,182	81,08108	MED	
	MED+3S	1,608	0,65	0,423	73,69403	X+3S	
VDw	MAX	1,707	0,632	0,704	58,75806	MAX	0,13
	MED	1,275	0,387	0,279	78,11765	MED	N/A
	MED+3S	2,331	0,902	0,784	66,36637	X+3S	/
L	MAX	43,3	17,14	18,77	56,65127	MAX	5,4
	MED	31,61	11,4	8,378	73,49573	MED	3,4
	MED+3S	60,95	24,58	20,23	66,80886	X+3S	7,1
M	MAX	60,02	28,83	13,99	76,6911	MAX	7,1
	MED	52,48	15,41	10,3	80,37348	MED	5,3
	MED+3S	74,3	35,3	19,79	73,36474	X+3S	9,5
M1	MAX	41,26	15,39	12,09	70,69801	MAX	3,8
	MED	31,92	9,659	6,115	80,84273	MED	2,5
	MED+3S	50,27	21,15	16,1	67,97295	X+3S	5
H	MAX	275,6	69,48	29,35	89,35051	MAX	16,5
	MED	250,5	32,19	17,36	93,06986	MED	15,5
	MED+3S	289,1	80,98	31,4	89,13871	X+3S	22

Tabella 99 Dati Rugosimetro TEST 15

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,1195	0,0116	0,0131
2	0,1111	0,0124	0,012
3	0,1239	0,0075	0,0118
4	0,1559	0,0164	0,0099
5	0,0867	0,0122	0,0116
6	0,121	0,0118	0,0143
7	0,1136	0,0099	0,0151
8	0,0992	0,0142	0,0116
9	0,1129	0,0111	0,0152
10	0,1303	0,0138	0,0126
AVG [μm]	0,11741	0,01209	0,01272
Ra [%]	89,16616983		

Tabella 100 Risposte percentuali TEST 15

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
4,863	66,458	75,684	88,006

6.16 TEST 16

Tabella 101 Parametri TEST 16

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
7,5	35	27,5

Tabella 102 Tracciabilità TEST 16

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. scarico
10/03/2022	75	04218ZN	PREFINITURA	6	0

Tabella 103 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 16

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	6,561	NO DIFETTI	27
01:00	5,301		
02:00	4,082		
03:00	3,039		
04:00	1,997	NO DIFETTI	
CUT RATE	4,564		

Tabella 104 Dati MWA TEST 16

PARAMETER		00:00	02:00	04:00	[%]	TOLLERANZE	
Δr	MAX	1,341	0,255	0,235	82,47576	MAX	0,13
	MED	0,801	0,186	0,168	79,02622	MED	
	MED+3S	1,524	0,328	0,279	81,69291	X+3S	
VDw	MAX	1,703	0,422	0,445	73,86964	MAX	0,13
	MED	1,083	0,264	0,288	73,4072	MED	N/A
	MED+3S	2,09	0,569	0,503	75,93301	X+3S	/
L	MAX	39,24	14,24	10,78	72,52803	MAX	5,4
	MED	26,93	7,65	7,821	70,95804	MED	3,4
	MED+3S	52,5	18,36	12,27	76,62857	X+3S	7,1
M	MAX	40,52	16,48	17,4	57,05824	MAX	7,1
	MED	35,51	11,26	10,3	70,99409	MED	5,3
	MED+3S	47,93	20,32	21,05	56,08179	X+3S	9,5
M1	MAX	30,73	13,45	12,68	58,73739	MAX	3,8
	MED	23,14	7,986	6,361	72,5108	MED	2,5
	MED+3S	37,38	17,15	15,34	58,96201	X+3S	5
H	MAX	255,4	23,1	27,58	89,20125	MAX	16,5
	MED	179,8	17,94	17,26	90,40044	MED	15,5
	MED+3S	261	25,04	29,38	88,7433	X+3S	22

Tabella 105 Dati Rugosimetro TEST 16

N° SFERA	00:00	02:00	04:00
1	0,1104	0,0136	0,013
2	0,11	0,0133	0,0127
3	0,0857	0,013	0,0134
4	0,0939	0,0144	0,0157
5	0,0956	0,0089	0,0136
6	0,0832	0,0128	0,0097
7	0,105	0,0132	0,0121
8	0,0861	0,0108	0,0124
9	0,0901	0,0109	0,0134
10	0,0906	0,0149	0,0089
AVG [μm]	0,09506	0,01258	0,01249
Ra [%]	86,86092994		

Tabella 106 Risposte percentuali TEST 16

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
4,564	65,376	74,706	88,223

7. RISULTATI SFERE DIAMETRO 17.462

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva contenente tutte le risposte calcolate come variazione percentuale tra le caratteristiche del lotto al termine della prima fase di processo e le caratteristiche dello stesso lotto al termine del processo di prefinitura.

Tabella 107 Risultati variazione rispetto al singolo lotto

TEST	Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]	VDw [%]	M1[%]	CUTRATE [μm]	Ra [%]
1	7	30	20	63.117	41.56	4.591	80.346
2	8	30	20	76.904	77.441	4.358	89.535
3	7	40	20	78.811	67.476	5.106	89.033
4	8	40	20	60.754	64.153	5.56	89.276
5	7	30	35	83.938	85.935	4.783	91.478
6	8	30	35	79.263	70.683	4.604	90.645
7	7	40	35	85.946	80.931	5.949	91.66
8	8	40	35	76.882	71.706	5.688	86.984
9	7.5	35	27.5	68.544	49.538	5.097	86.899
10	7	35	27.5	75.057	56.892	4.587	82.578
11	8	35	27.5	77.201	74.868	5.36	89.606
12	7.5	30	27.5	76.292	56.709	4.376	85.315
13	7.5	40	27.5	81.102	67.253	5.857	89.071
14	7.5	35	20	73.641	69.039	4.956	87.036
15	7.5	35	35	78.118	80.843	4.863	89.166
16	7.5	35	27.5	73.407	72.511	4.564	86.861

Come si può notare, per quanto riguarda le risposte relative ai parametri individuati dal MWA si ha un'elevata differenza. Si hanno infatti dei valori massimi di 85,946 [%] e 85,935 [%] e dei valori minimi di 60,754 [%] e 41,56 [%] rispettivamente per il VDw e per M1. Osservando la totalità dei dati raccolti si nota come questa eccessiva variabilità sia dovuta alla elevata variabilità delle caratteristiche del lotto in ingresso e non alle caratteristiche finali del lotto. Si riporta di seguito una tabella relativa alle caratteristiche di tutti e 16 i lotti al tempo 00:00. In tale tabella viene riportata anche la deviazione standard dei vari parametri rapportata alla media del parametro in esame.

$$DEV.STD [\%] = \frac{DEV.ST}{MEDIA} * 100 \quad (1)$$

In questo modo è possibile mettere a confronto la variabilità dei vari parametri

STRUMENTO	PARAMETRO	MEDIA	MAX	MIN	DEV.STD [%]	
MWA	Δr	MAX	1,223	2,042	0,827	26,393
		MED	0,832	1,083	0,462	21,111
		MED+3S	1,442	2,166	1,035	24,388
	VDw	MAX	1,819	2,694	1,313	22,692
		MED	1,216	1,601	0,648	21,145
		MED+3S	2,243	3,147	1,683	21,495
	L	MAX	41,017	54,500	23,990	21,947
		MED	27,165	36,080	12,690	24,345
		MED+3S	52,990	75,590	30,015	23,328
	M	MAX	51,525	80,380	30,580	29,552
		MED	37,567	56,440	18,800	28,496
		MED+3S	59,726	92,160	34,760	29,895
	M1	MAX	36,346	58,130	16,490	27,179
		MED	25,148	40,120	11,090	28,192
		MED+3S	46,075	75,070	21,535	26,923
H	MAX	244,093	337,400	153,500	20,057	
	MED	202,894	292,500	104,720	25,605	
	MED+3S	262,314	365,100	163,400	20,188	
RUGOSIMETRO	Ra	0,106	0,136	0,067	18,745	

Tabella 108 Caratteristiche lotti all'ora 00:00

Per una più semplice comprensione si vanno ad estrarre dalla tabella 2 le caratteristiche relative ai valori medi essendo questi i valori che si andranno ad utilizzare durante le successive analisi.

STRUMENTO	PARAMETRO	MEDIA	MAX	MIN	DEV.STD [%]
MWA	Δr	0,832	1,083	0,462	21,111
	VDw	1,216	1,601	0,648	21,145
	L	27,165	36,080	12,690	24,345
	M	37,567	56,440	18,800	28,496
	M1	25,148	40,120	11,090	28,192
	H	202,894	292,500	104,720	25,605
RUGOSIMETRO	Ra	0,106	0,136	0,067	18,745

Tabella 109 Caratteristiche medie lotti all'ora 00:00

A seguito di tali valori è stato deciso di calcolare la variazione percentuale delle varie caratteristiche non più sul singolo lotto, bensì tra le caratteristiche del lotto all'ora 04:00 e la media delle caratteristiche medie di tutti i lotti all'ora 00:00. In questo modo andando ad ottimizzare le varie risposte non solo si ottimizza il lavoro della macchina ma si va anche ad ottimizzare la qualità finale del prodotto indipendentemente dalla qualità all'inizio della lavorazione. È stato dunque fissato un range di accettabilità sui valori di DEV.STD [%]. Tale range è stato individuato anche mediante l'analisi su R. Al di sotto di una DEV.STD [%] del 20% si è deciso di calcolare le variazioni percentuali rispetto alle caratteristiche in ingresso del singolo lotto. Al di sopra di una DEV.STD [%] del 35% sarebbe stata considerata una variabilità troppo elevata e dunque si sarebbero ripetuti i test responsabili.

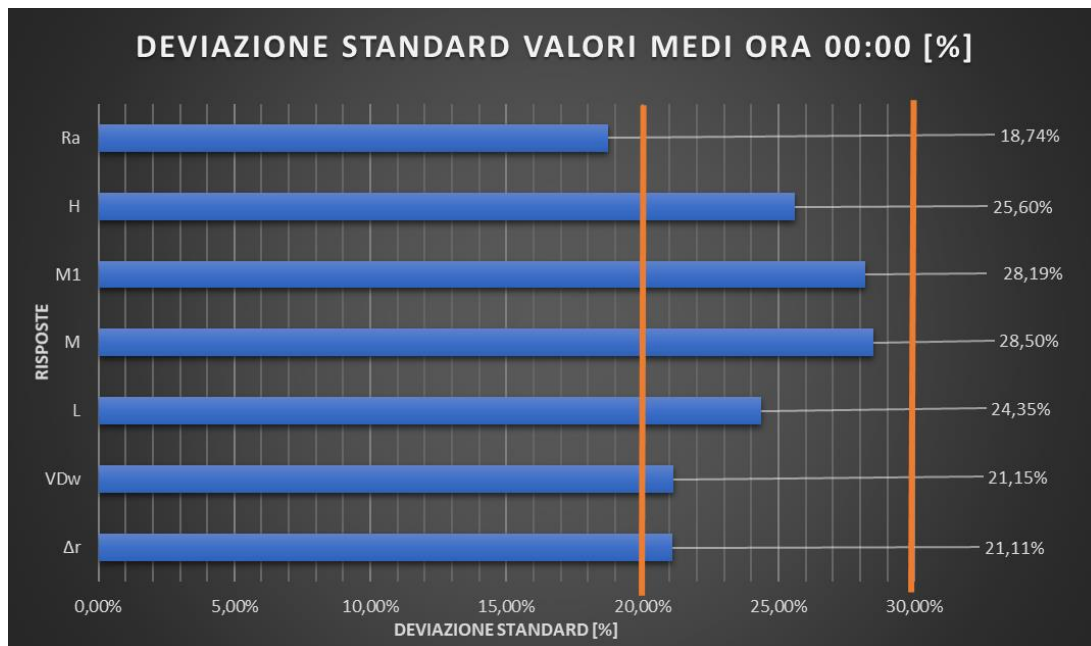


Figura 129 DEV.STD [%]

Come è facilmente osservabile dal grafico riportato tutti i parametri calcolati dall'MWA risultano all'interno del range. Ciò non risulta invece veritiero per il valore di rugosità Ra. Si riporta ora una tabella riassuntiva contenente le risposte relative al CUT RATE e al Ra calcolate come variazione percentuale tra le caratteristiche del lotto al termine della prima fase di processo e le caratteristiche dello stesso lotto al termine del processo di prefinitura e le risposte relative al VDw e al M1 calcolata sfruttando la media delle caratteristiche dei vari lotti all'ora 00:00.

Tabella 110 Risultati utilizzati durante l'analisi

TEST	Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [L/MIN]	VDw [%]	M1[%]	CUTRATE [μm]	Ra [%]
1	7	30	20	71.267	74.228	4.591	80.346
2	8	30	20	66.458	70.622	4.358	89.535
3	7	40	20	63.572	68.236	5.106	89.033
4	8	40	20	53.714	67.699	5.56	89.276
5	7	30	35	70.185	77.561	4.783	91.478
6	8	30	35	72.95	74.725	4.604	90.645
7	7	40	35	72.95	77.775	5.949	91.66
8	8	40	35	63.452	73.29	5.688	86.984
9	7.5	35	27.5	61.048	68.276	5.097	86.899
10	7	35	27.5	73.551	72.145	4.587	82.578
11	8	35	27.5	68.862	71.648	5.36	89.606
12	7.5	30	27.5	69.103	70.339	4.376	85.315
13	7.5	40	27.5	65.376	71.509	5.857	89.071
14	7.5	35	20	65.015	70.92	4.956	87.036
15	7.5	35	35	66.458	75.684	4.863	89.166
16	7.5	35	27.5	65.376	74.706	4.564	86.861

Si procede ora con l'analisi vera e propria sul software Rstudio. Tale analisi seguirà la stessa metodologia spiegata nel capitolo 3. Ne verranno dunque riassunti i punti salienti nella definizione del modello relativo al CUT RATE mentre per tutte le altre risposte verranno riportati solamente i risultati. Si riportano inoltre solo l'analisi eseguita sul software Rstudio. L'analisi condotta sul software Minitab viene riportata in appendice nel capitolo 13.1.

7.1 MODELLO CUTRATE

La prima parte dell'analisi prevede l'individuazione dei fattori più significativi attraverso le tabelle dell'ANOVA. Indipendentemente dal valore del p-value verranno comunque considerati parte del modello i termini al primo ordine. Nel software Rstudio per effettuare tale analisi viene sfruttata la funzione "rsm()". Nella tabella dell'ANOVA verranno evidenziati i fattori più significativi individuati attraverso il p-value. È dunque necessario scegliere il livello di significatività α con il quale confrontare i *p-value* per valutare l'ipotesi nulla. Si ricorda che l'ipotesi nulla prevede che non ci siano differenze nelle medie delle risposte attribuibili ai fattori oggetto di indagine.

In generale viene scelto un valore di α compreso tra 0,1 e 0,01. Questo implica di accettare un rischio compreso tra il 10% e 1% di rifiutare in modo errato l'ipotesi nulla. Qualora si verifichi tale situazione stiamo erroneamente considerando un fattore come significativo per la risposta anche se in realtà non lo è.

1. $P_value > \alpha$: il fattore non è statisticamente significativo;
2. $P_value < \alpha$: il fattore è statisticamente significativo.

Si procede quindi eliminando via via i termini non significativi dal modello.

Tabella 111 Tabella ANOVA CUTRATE

CUT RATE					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO (x1, x2, x3)	3	3,1719	1,05732	9,2811	0,01135
I (x1*x2)	1	0,0458	0,04575	0,4016	0,54963
I (x1*x3)	1	0,0546	0,05462	0,4794	0,51458
I (x2*x3)	1	0,0355	0,03551	0,3117	0,59683
TWI (x1, x2, x3)	3	0,1359	0,04529	0,3976	0,75987
I (x1^2)	1	0,0425	0,04248	0,3729	0,56383
I (x2^2)	1	0,0848	0,08484	0,7447	0,4213
I (x3^2)	1	0,0021	0,00207	0,0182	0,89719
PQ (x1, x2, x3)	3	0,1294	0,04313	0,3786	0,77223
Residuals	6	0,6835	0,11392		
Lack of fit	5	0,5415	0,1083	0,7624	0,69606
Pure error	1	0,142	0,142		

Per quanto riguarda il CUT RATE risultano dunque statisticamente significativi solo i termini del 1° ordine. Il proseguo dell'analisi verrà condotto dunque solo su tali termini.

Tabella 112 Tabella ANOVA CUT RATE fattori più significativi

CUT RATE					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO (x1, x2, x3)	3	3,1719	1,05732	13,3725	0,0003914
I (x1*x2)					
I (x1*x3)					
I (x2*x3)					
TWI (x1, x2, x3)					
I (x1^2)					
I (x2^2)					
I (x3^2)					
PQ (x1, x2, x3)					
Residuals	12	0,9488	0,07907		
Lack of fit	11	0,8068	0,07334	0,5163	0,8084785
Pure error	1	0,142	0,142		

Una volta individuati i fattori più significativi si procede con l'individuazione dei coefficienti moltiplicativi che andranno a realizzare il modello. Questo viene realizzato sempre attraverso la funzione "rsm()". I coefficienti moltiplicativi variano però se si considera un'analisi codificata oppure un'analisi non codificata. Si ricorda che in un'analisi codificata i livelli dei vari fattori sono rapportati a 1,-1 e 0 mentre nell'analisi non codificata vengono riportati i valori reali. In quanto i modelli verranno riportati utilizzando i valori reali di pressione, velocità e portata si riportano i coefficienti individuati solo attraverso l'analisi non codificata. I coefficienti relativi all'analisi non codificata sono riportati in appendice nel capitolo 13.2.

Tabella 113 Tabella coefficienti CUT RATE analisi non codificata

CUT RATE				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)	-0,10845	1,509195	-0,0719	0,9439
Pressione	0,1108	0,177839	0,623	0,5449
Velocità	0,10896	0,017784	6,1269	5,123E-05
Portata	0,017547	0,011856	1,48	0,1646
I (press*vel)				
I (press*por)				
I (vel*por)				
I (pressione^2)				
I (velocità^2)				
I (portata^2)				

Si riporta dunque il modello individuato:

$$CUT\ RATE = 0,1108 * PRESSIONE + 0,10896 * VELOCITA' + 0,01755 * PORTATA \quad (1)$$

Si procede ora con la validazione del modello attraverso una serie di grafici

7.1.1 GRAFICO DI PARETO

Si ricorda che il grafico di Pareto viene utilizzato per osservare graficamente il peso dei coefficienti moltiplicativi all'interno del modello. I fattori vengono riportati in ordine di significatività. La variabile in ordinata è una variabile continua, mentre la variabile in ascissa, ovvero i fattori, è discreta. La variabile in ordinata corrisponde al T-value calcolato mediante la funzione "rsm()" e riportato all'interno della tabella dei coefficienti

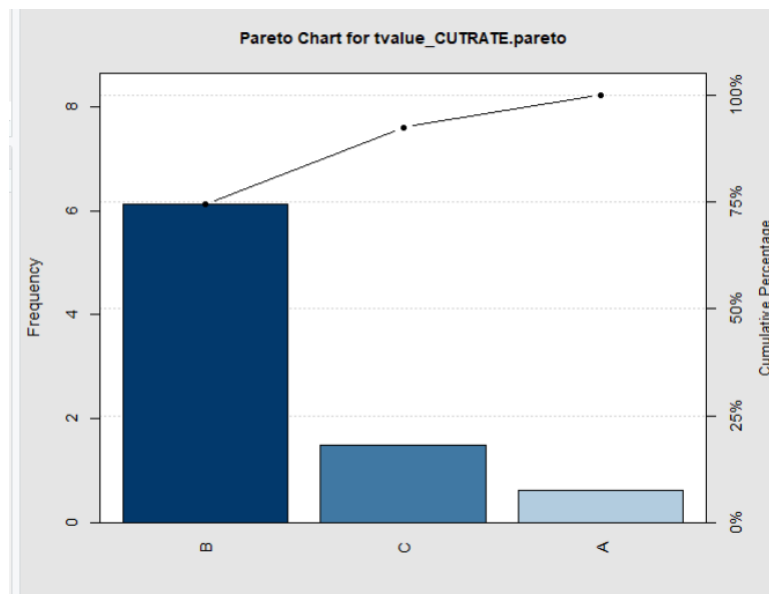


Figura 130 Grafico di Pareto CUT RATE

In tale grafico i fattori sono riportati come A, B e C. Questi corrispondono rispettivamente a :

- A=pressione
- B=velocità
- C=portata

Il fattore più significativo, dunque, secondo il grafico di Pareto risulta essere la velocità mentre quello meno significativo risulta essere la portata.

7.1.2 GRAFICI SUI RESIDUI

I grafici sui residui vengono utilizzati per avere una rapida risposta sul fatto che i risultati ottenuti siano sensati e che quindi il modello risulti adeguato. Si hanno due tipi di grafici sui residui ed entrambi vengono utilizzati per validare un'ipotesi:

- **Grafico di probabilità normale dei residui:**

questo è utilizzato per verificare l'assunzione che i residui siano distribuiti normalmente. Tale assunzione viene validata nel caso in cui si abbia un set di punti che si distribuisce il più vicino possibile ad una retta. Come si può vedere nell'immagine sottostante tale assunzione viene verificata per il modello mdel CUT RATE.

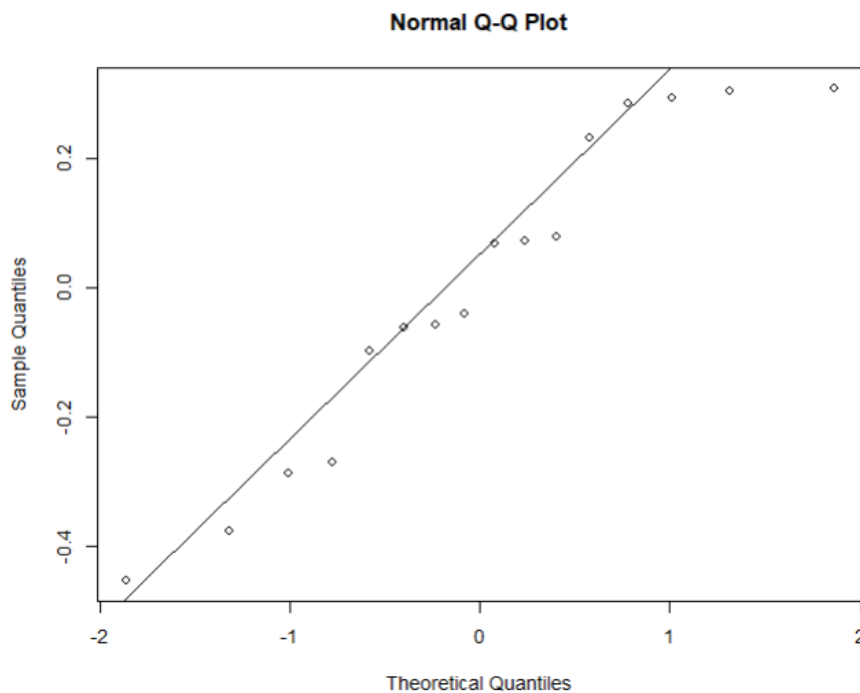


Figura 131 Grafico probabilità normale dei residui CUT RATE

- **Grafico Residual vs fitted:**

Tale grafico vuole verificare l'ipotesi che i residui siano distribuiti casualmente e che abbiano una varianza costante. Ciò viene verificato se si ha un set di n punti distribuiti in modo casuale al di sopra e al di sotto dello 0 senza mostrare tendenze. Come si può vedere nell'immagine sottostante tale ipotesi è validata per il modello del CUT RATE.

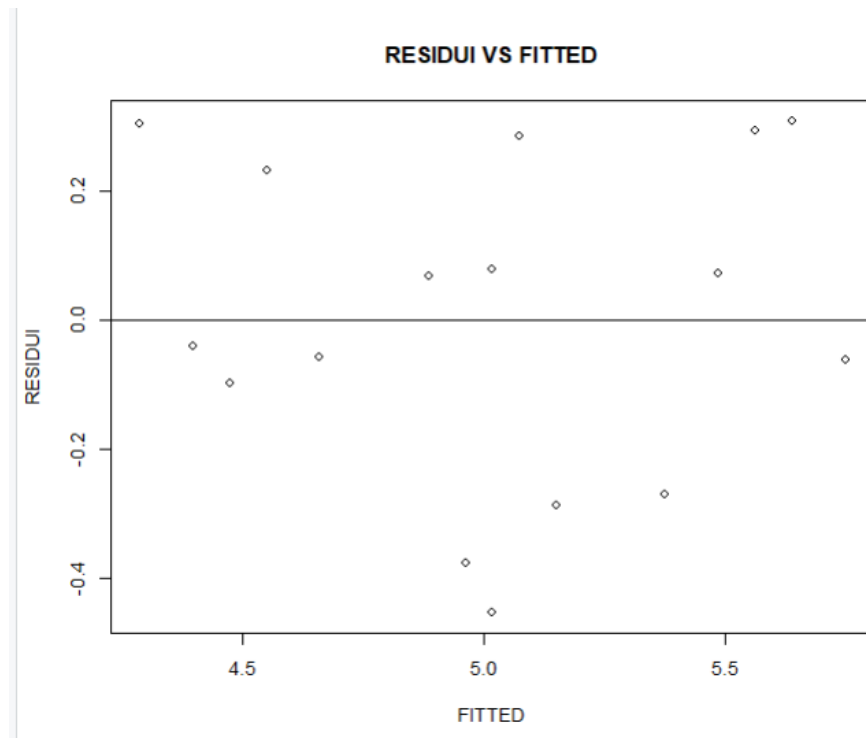


Figura 132 Grafico Residui vs Fitted CUT RATE

7.1.3 Superfici di risposta

Le superfici di risposta vengono utilizzate per spiegare graficamente ciò che viene spiegato analiticamente attraverso le equazioni di regressione. Si avrà dunque il piano orizzontale sui cui assi si individua il range di variazione di due fattori (assi x e y). Sull'asse verticale (asse z) si ha invece la risposta in esame. Affianco alle superfici di risposte è opportuno realizzare anche i contour plot ovvero la rappresentazione di una superficie tridimensionale (x,y,z) in un piano bidimensionale (x,y) andando a tracciare delle sezioni a valori z costanti. Di seguito verranno riportate le superfici di risposta e il corrispettivo contour plot associati alla risposta CUT RATE.

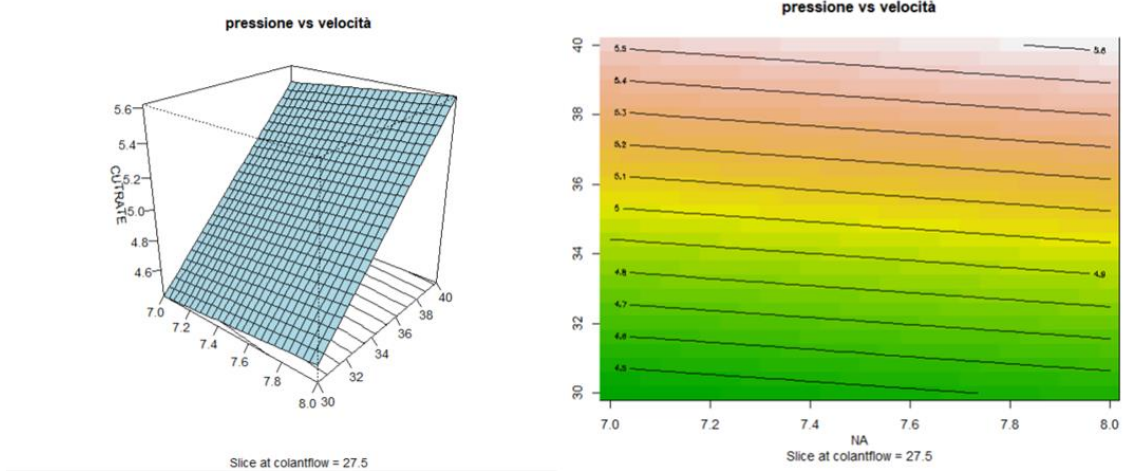


Figura 134 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) CUT RATE pressione vs velocità

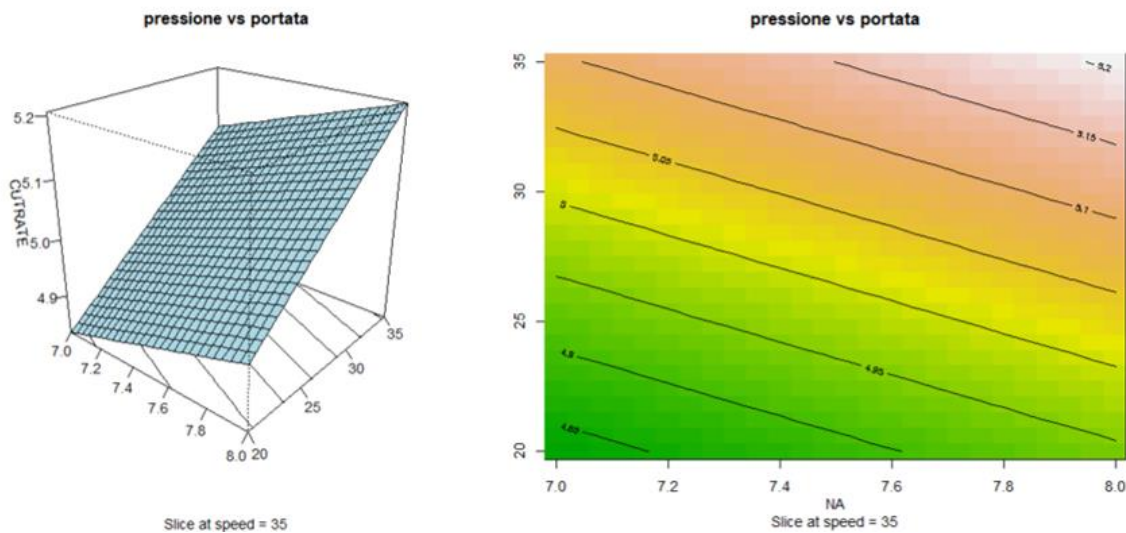


Figura 133 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) CUT RATE pressione vs portata

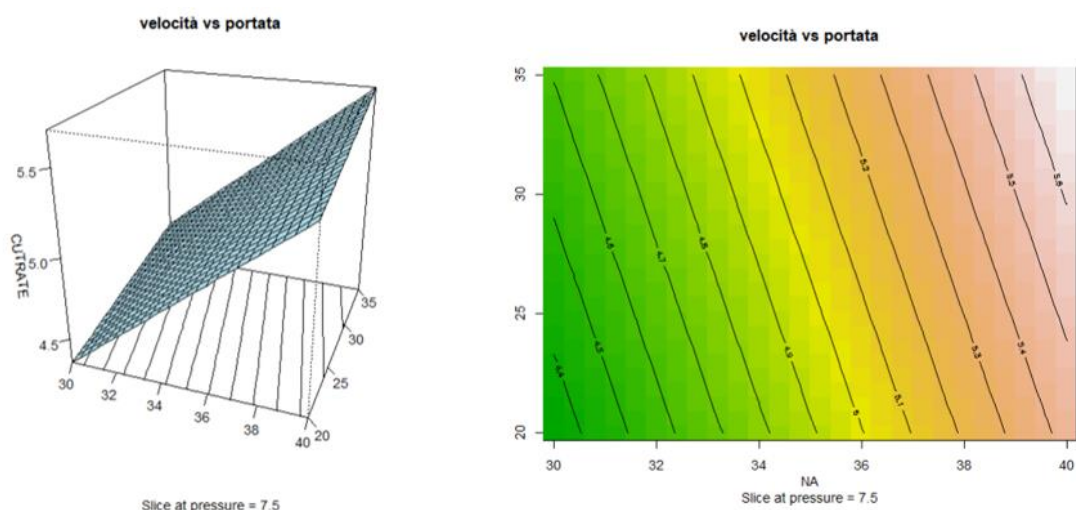


Figura 135 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) CUT RATE velocità vs portata

7.2 MODELLO VDw

Tabella 114 Tabella ANOVA VDw

VDw					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO (x1, x2, x3)	3	230,977	76,992	7,4974	0,01874
I (x1*x2)	1	37,463	37,463	3,6481	0,10471
I (x1*x3)	1	7,869	7,869	0,7662	0,41505
I (x2*x3)	1	23,482	23,482	2,2866	0,18125
TWI (x1, x2, x3)	3	68,814	22,938	2,2337	0,18487
I (x1^2)	1	19,839	19,839	1,931	0,21392
I (x2^2)	1	3,789	3,789	0,369	0,56583
I (x3^2)	1	10,571	10,571	1,0294	0,34946
PQ (x1, x2, x3)	3	34,199	11,4	1,1101	0,41572
Residuals	6	61,615	10,269		
Lack of fit	5	52,249	10,45	1,1157	0,61274
Pure error	1	9,366	9,366		

Tabella 115 Tabella ANOVA VDw fattori più significativi

VDw					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO (x1, x2, x3)	3	230,977	76,992	5,6121	0,01221
I (x1*x2)					
I (x1*x3)					
I (x2*x3)					
TWI (x1, x2, x3)					
I (x1^2)					
I (x2^2)					
I (x3^2)					
PQ (x1, x2, x3)					
Residuals	12	164,627	13,719		
Lack of fit	11	155,262	14,115	1,507	0,56741
Pure error	1	9,366	9,366		

Tabella 116 Tabella coefficienti VDw analisi non codificata

VDw					
		Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)		118,0744	19,87966	5,9395	6,82E-05
x1		-5,2178	2,34256	-2,2274	0,04583
x2		-0,61798	0,23426	-2,6381	0,02165
x3		0,3465	0,15617	2,2171	0,04668
I (x1*x2)					
I (x1*x3)					
I (x2*x3)					
I (x1^2)					
I (x2^2)					
I (x3^2)					

$$VDw [\%] = 118,0744 - 5,2178 * \text{pressione} - 0,61798 * \text{velocità} + 0,347 * \text{portata} \quad (2)$$

7.2.1 GRAFICO DI PARETO

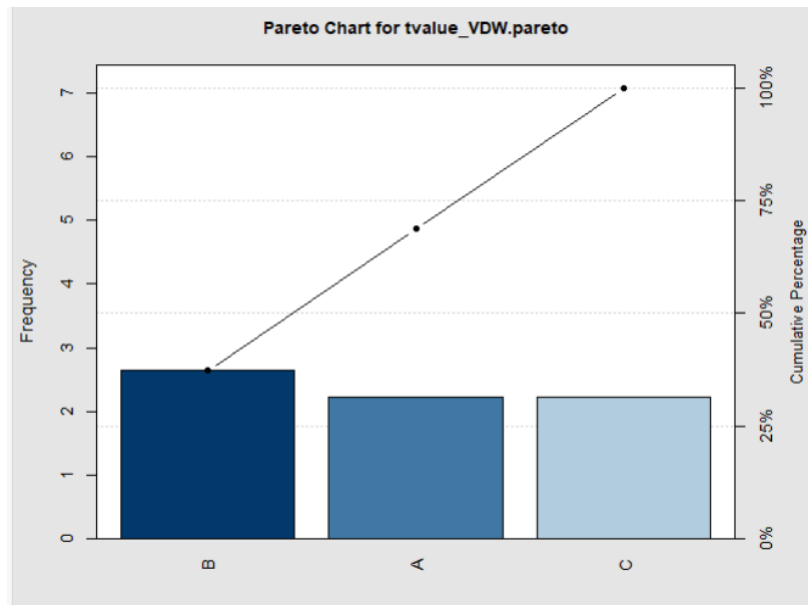


Figura 136 Grafico di Pareto VDw

7.2.2 GRAFICI SUI RESIDUI

- **Grafico di probabilità normale dei residui:**

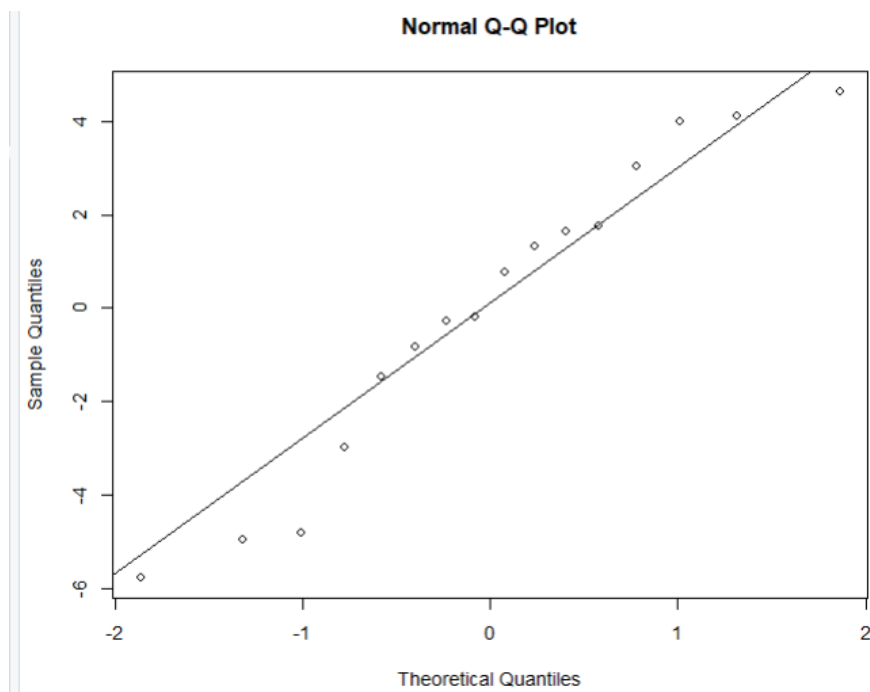


Figura 137 Grafico probabilità normale dei residui VDw

- **Grafico residua vs fit:**

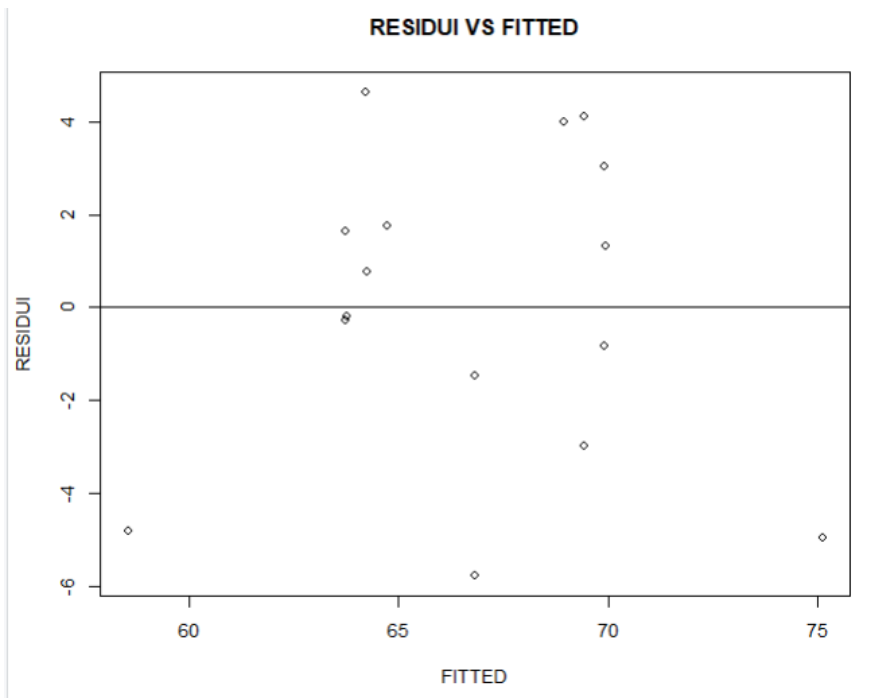


Figura 138 Grafico Residui vs Fitted VDw

7.2.3 Superfici di risposta

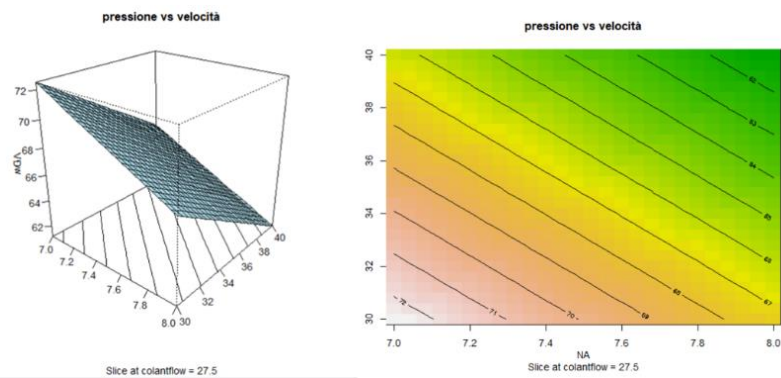


Figura 139 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) VDw pressione vs velocità

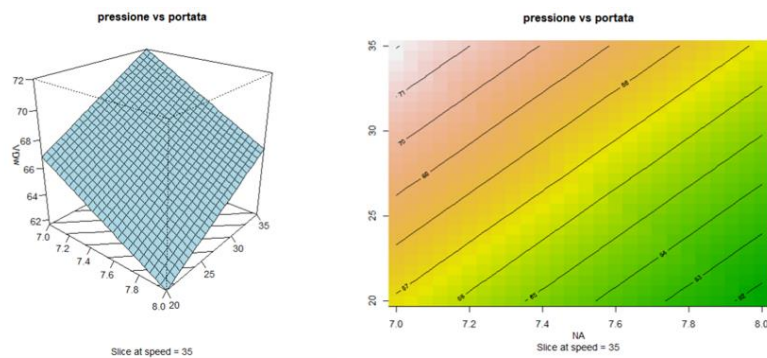


Figura 140 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) VDw pressione vs portata

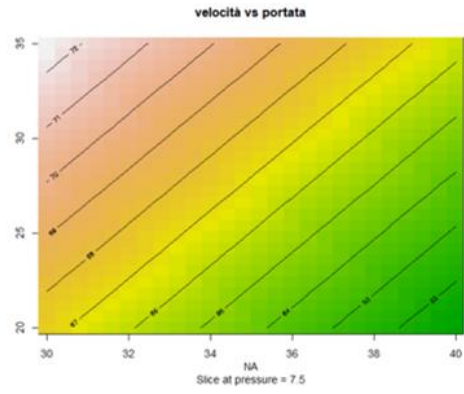
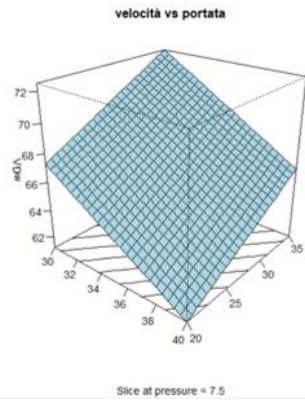


Figura 141 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) VDw velocità vs portata

7.3 MODELLO M1

Tabella 117 Tabella ANOVA M1

M1					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO (x1, x2, x3)	3	97,038	32,346	6,1612	0,02907
I (x1*x2)	1	0,252	0,252	0,048	0,83383
I (x1*x3)	1	1,262	1,262	0,2405	0,64128
I (x2*x3)	1	7,4	7,4	1,4095	0,28001
TWI (x1, x2, x3)	3	8,914	2,971	0,566	0,65729
I (x1^2)	1	2,952	2,952	0,5623	0,4817
I (x2^2)	1	0,01	0,01	0,0019	0,96675
I (x3^2)	1	8,165	8,165	1,5553	0,25882
PQ (x1, x2, x3)	3	11,127	3,709	0,7065	0,58225
Residuals	6	31,5	5,25		
Lack of fit	5	10,827	2,165	0,1048	0,97283
Pure error	1	20,672	20,672		

Tabella 118 Tabella ANOVA M1 fattori più significativi

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO (x1, x2, x3)	3	97,038	32,346	7,5309	0,004282
I (x1*x2)					
I (x1*x3)					
I (x2*x3)					
TWI (x1, x2, x3)					
I (x1^2)					
I (x2^2)					
I (x3^2)					
PQ (x1, x2, x3)					
Residuals	12	51,541	4,295		
Lack of fit	11	30,869	2,806	0,1357	0,979859
Pure error	1	20,672	20,672		

Tabella 119 Tabella coefficienti M1 analisi non codificata

M1					
		Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)		86,65688	11,12335	7,7905	4,98E-06
x1		-2,3922	1,310742	-1,8251	0,092968
x2		-0,17932	0,131074	-1,3681	0,196359
x3		0,3644	0,087383	4,1702	0,001299
I (x1*x2)					
I (x1*x3)					
I (x2*x3)					
I (x1^2)					
I (x2^2)					
I (x3^2)					

$$M1 [\%] = 86,657 - 2,3922 * pressione - 0,179 * velocità + 0,3644 * portata \quad (3)$$

7.3.1 Grafico di Pareto

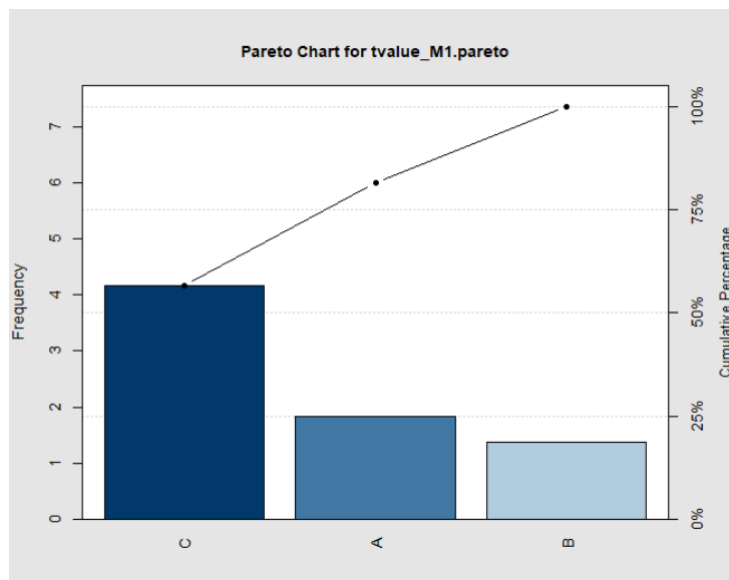


Figura 142 Grafico di Pareto M1

7.3.2 Grafici sui residui

- **Grafico di probabilità normale dei residui:**

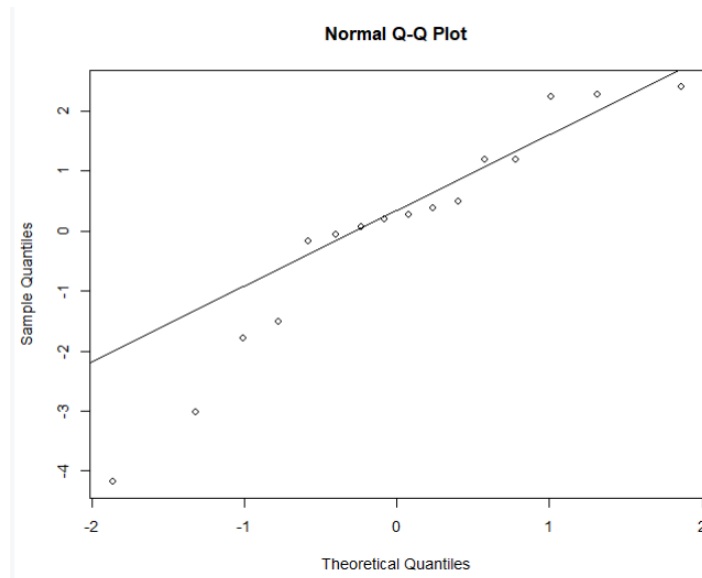


Figura 143 Grafico probabilità normale dei residui M1

- **Grafico residual vs fitted:**

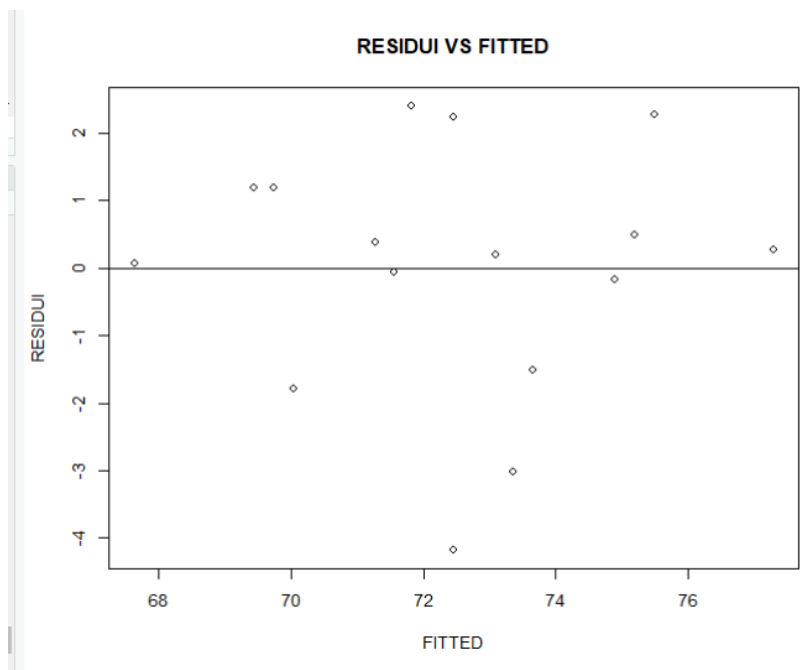


Figura 144 Grafico residual vs fitted M1

7.3.3 Superfici di risposta

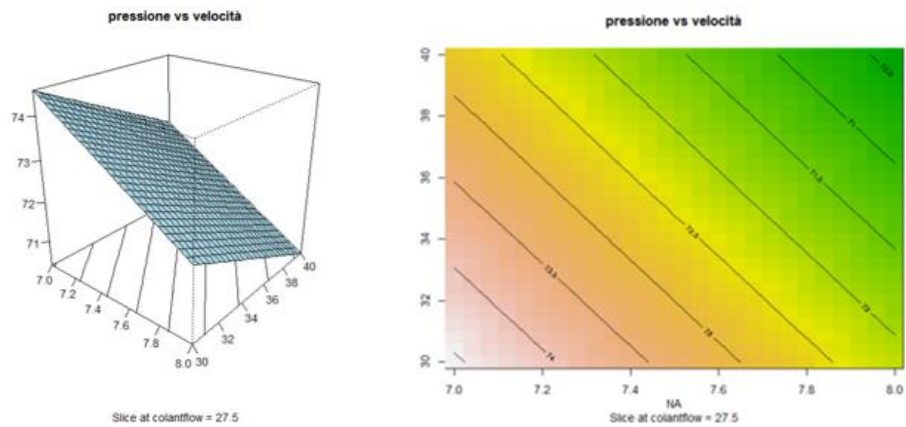


Figura 145 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) M1 pressione vs velocità

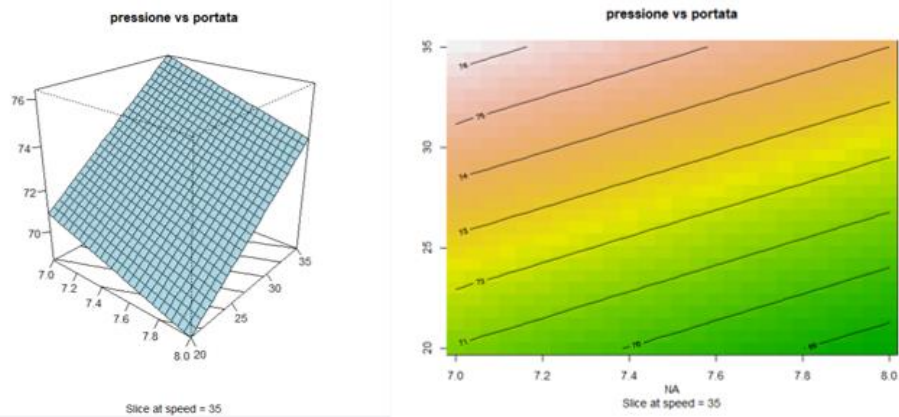


Figura 147 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) M1 pressione vs portata

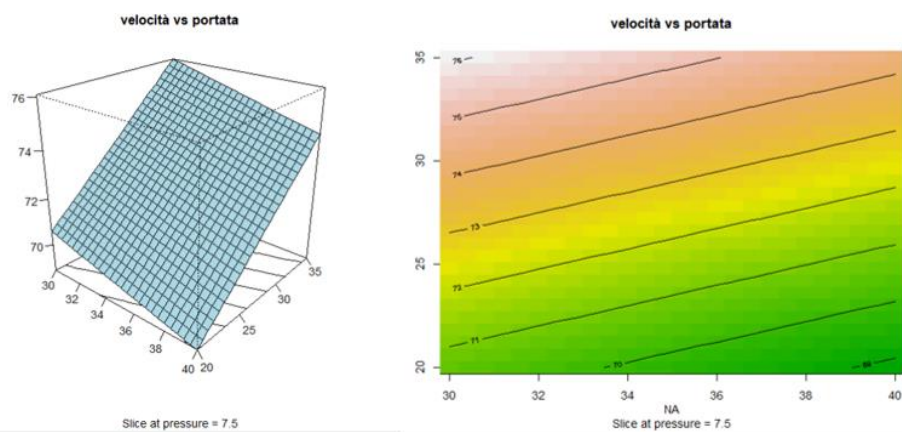


Figura 146 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) M1 velocità vs portata

7.4 MODELLO Ra

Tabella 120 Tabella ANOVA Ra

Ra					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO (x1, x2, x3)	3	41,2	13,7332	3,9043	0,073365
I (x1*x2)	1	20,445	20,445	5,8123	0,052511
I (x1*x3)	1	27,904	27,904	7,933	0,030492
I (x2*x3)	1	17,722	17,722	5,0383	0,065928
TWI (x1, x2, x3)	3	66,071	22,0237	6,2612	0,028069
I (x1^2)	1	1,959	1,959	0,5569	0,4837
I (x2^2)	1	4,536	4,536	1,284	0,299465
I (x3^2)	1	7,023	7,023	1,9966	0,207366
PQ (x1, x2, x3)	3	13,518	4,509	1,281	0,363013
Residuals	6	21,105	3,5175		
Lack of fit	5	21,104	4,2208	5846,052	0,009929
Pure error	1	0,001	0,0007		

Tabella 121 Tabella ANOVA Ra fattori più significativi

Ra					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO (x1, x2, x3)	3	41,2	13,7332	3,5699	0,060063
I (x1*x2)	1	20,445	20,4448	5,3145	0,046591
I (x1*x3)	1	27,904	27,9042	7,2536	0,024665
I (x2*x3)	1	17,7722	17,7221	4,6068	0,060395
TWI (x1, x2, x3)	3	66,071	22,0237	5,725	0,017963
I (x1^2)					
I (x2^2)					
I (x3^2)					
PQ (x1, x2, x3)					
Residuals	9	34,623	3,847		
Lack of fit	8	34,623	4,3277	5994,102	0,009989
Pure error	1	0,001	0,0007		

Tabella 122 Tabella coefficienti Ra analisi non codificata

Ra					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(intercept)	-248,846	84,757487	-2,936	1,66E-02	
x1	38,26687	11,029482	3,4695	0,007054	
x2	6,06145	2,145185	2,8256	0,019864	
x3	5,320493	1,532714	3,4713	0,007034	
I (x1*x2)	-0,63945	0,277379	-2,3035	0,046591	
I (x1*x3)	-0,49803	0,184919	-2,6932	0,024665	
I (x2*x3)	-0,03969	0,018492	-2,1463	0,060395	
I (x1^2)					
I (x2^2)					
I (x3^2)					

$$Ra [\%] = -248,85 - 38,27 * pressione + 6,06 * velocità + 5,32 * portata + -0,639*press*vel -0,498*press*port -0,0397*vel*port \quad (4)$$

7.4.1 Grafico di Pareto

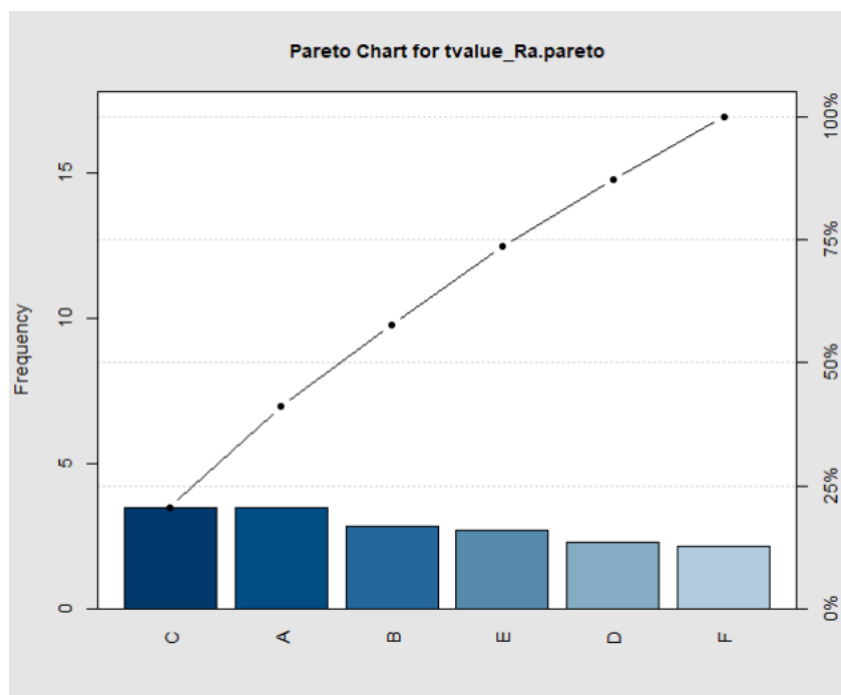


Figura 148 Grafico di pareto Ra

- A=pressione
- B=velocità
- C=portata
- D=pressione*velocità
- E=pressione*portata
- F=velocità*portata

7.4.2 Grafici sui residui

- **Grafico probabilità normale dei residui:**

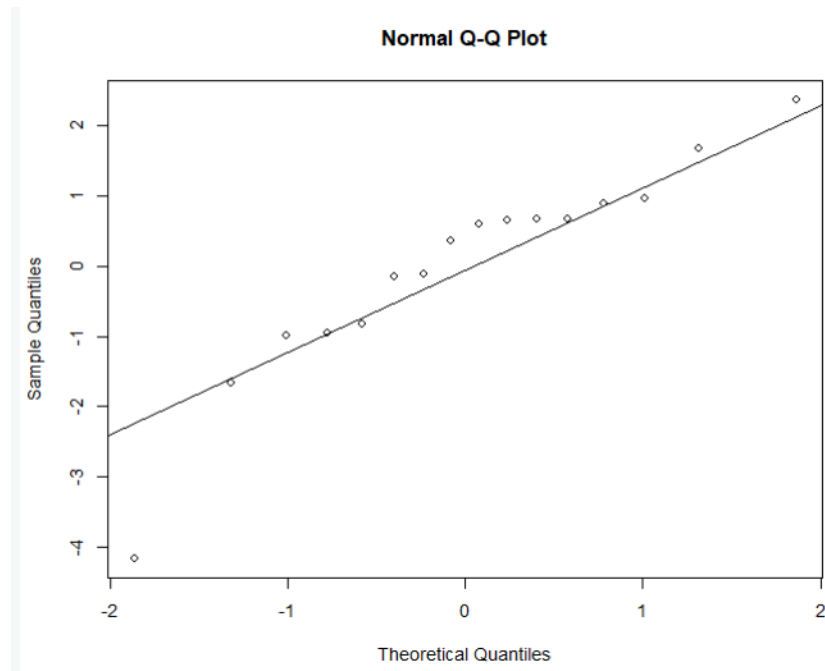


Figura 149 Grafico probabilità normale dei residui Ra

- **Grafico residui vs fitted:**

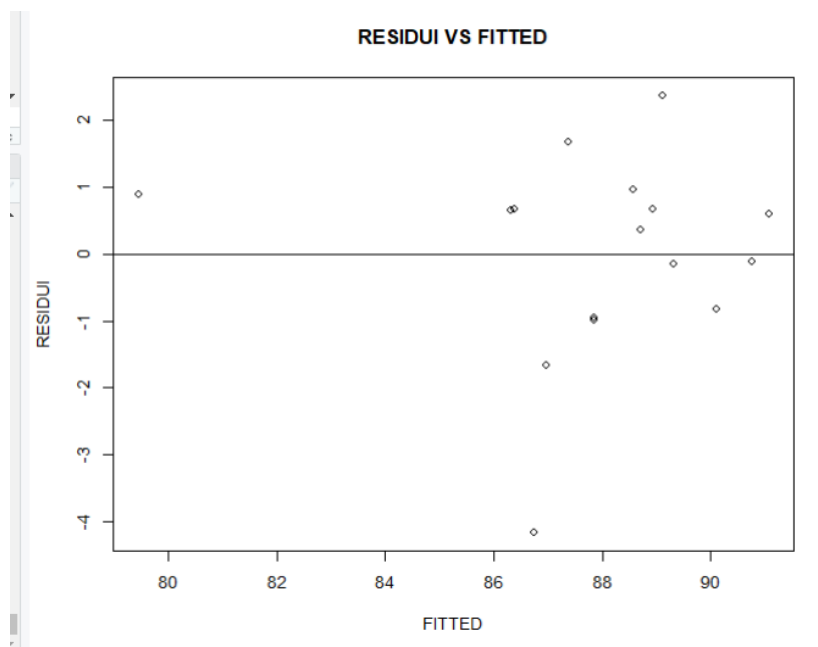


Figura 150 Grafico residui vs fitted Ra

7.4.3 Superfici di risposta

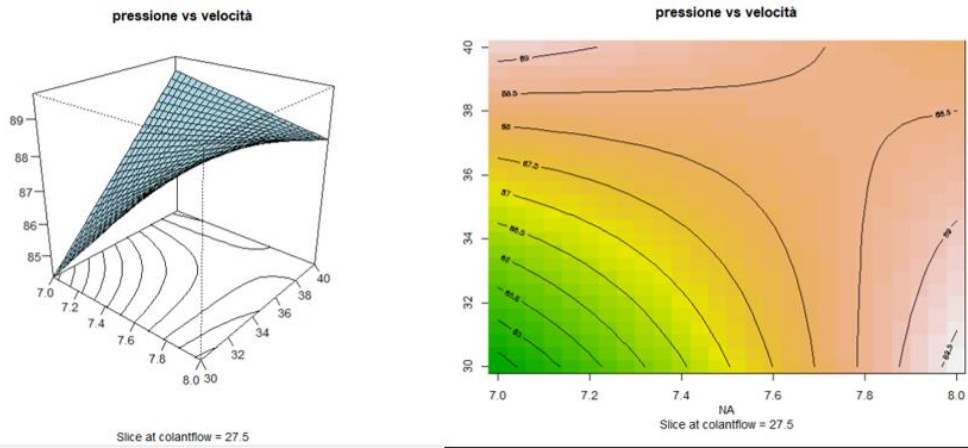


Figura 151 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) Ra pressione vs velocità

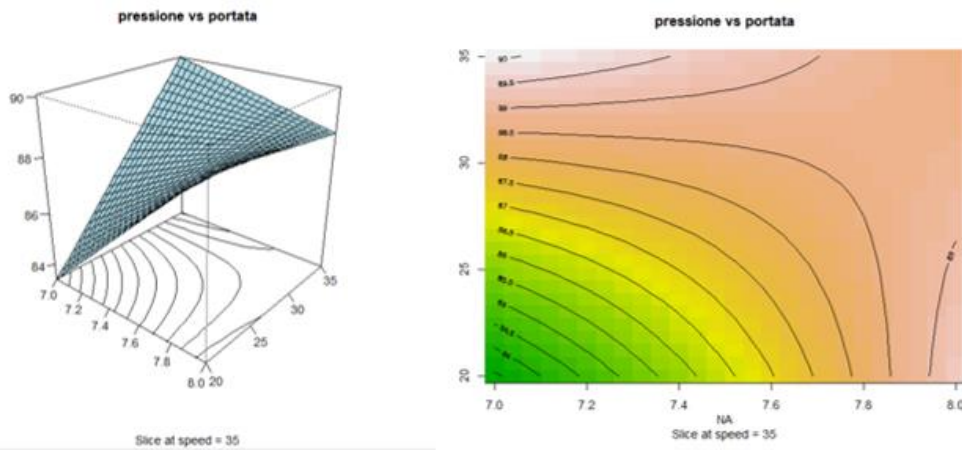


Figura 153 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) Ra pressione vs portata

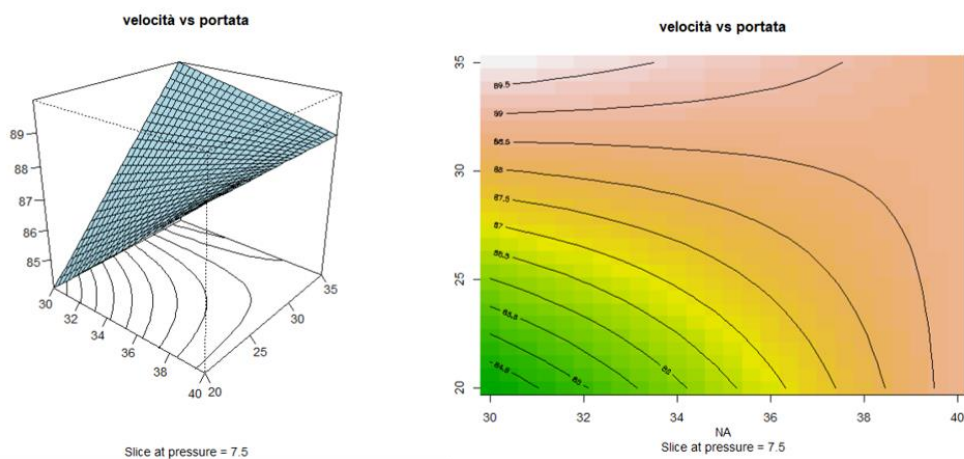


Figura 152 Superficie di risposta (sinistra) e contour plot (destra) Ra velocità vs portata

7.5 OTTIMIZZAZIONE DEI PARAMETRI

Anche il processo di ottimizzazione è stato spiegato nel capitolo 3. In questo capitolo ne verranno ripresi i punti salienti e presentati al termine i risultati. In quanto nella nuova analisi si è considerata la risposta relativa alla rugosità si procederà con due processi di ottimizzazione. Il primo processo di ottimizzazione non considererà la rugosità in modo da ottenere dei parametri ottimizzati confrontabili con quelli ottenuti nel lavoro precedente. Il secondo processo di ottimizzazione considererà anche la rugosità e individuerà quei parametri in grado di ottimizzare tutte e 4 le risposte.

$$CUT\ RATE = 0,1108 * PRESSIONE + 0,10896 * VELOCITA' + 0,01755 * PORTATA \quad (1)$$

$$VDw [\%] = 118,0744 - 5,2178 * pressione - 0,61798 * velocità + 0,347 * portata \quad (2)$$

$$M1 [\%] = 86,657 - 2,3922 * pressione - 0,179 * velocità + 0,3644 * portata \quad (3)$$

$$Ra [\%] = -248,85 - 38,27 * pressione + 6,06 * velocità + 5,32 * portata + \\ -0,639 * press * vel - 0,498 * press * port - 0,0397 * vel * port \quad (4)$$

Si ricorda che il processo di ottimizzazione parte dai modelli individuati negli step precedenti. Sul software Rstudio vengono individuati i parametri che massimizzano il singolo modello in modo da individuare il valore massimo delle risposte. Queste saranno dunque identificate come risposte target. Viene dunque costruita una funzione come somma delle singol funzioni divise rispettivamente per la rispettiva risposta target. Si procede dunque con la massimizzazione di tale funzione e infine verranno calcolati i valori di desirability e di composite desirability.

Sul software Rstudio per massimizzare le tre risposte verrà utilizzata la funzione “GA()”

I valori di “desirability” d_i e “composite desirability” D sono calcolati a partire dalla funzione di desiderabilità. Per ogni risposta $Y_i(x)$, una funzione di desiderabilità $d(Y_i)$ assegna numeri tra 0 e 1 ai possibili valori di Y_i , dove $d(Y_i) = 0$ rappresenta un valore completamente indesiderato e $d(Y_i) = 1$ rappresenta un valore di risposta ideale. Una classe utile di funzioni di desiderabilità è stata proposta da Derringer e Suich (1980).

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } Y(x) < L_i \\ \left(\frac{Y(x) - L_i}{T_i - L_i} \right)^s & \text{if } L_i < Y(x) < T_i \\ 1 & \text{if } Y(x) > T_i \end{cases} \quad (5)$$

7.5.1 Primo processo di ottimizzazione

Come detto precedentemente il primo processo di ottimizzazione riguarda le sole risposte studiate nel lavoro precedente ovvero:

- CUT RATE
- VD_w [%]
- M1 [%]

Ognuno dei modelli relativi a tale risposte è stato dunque inserito della funzione “ga()” come spiegato nel capitolo 3. Si riportano di seguito le due tabelle contenenti rispettivamente i parametri che massimizzano la singola risposta e le risposte target ottenute.

Tabella 123 Fattori che ottimizzano le singole risposte primo processo di ottimizzazione

FATTORE	CUT RATE	VD _w [%]	M1 [%]
PRESSIONE	8	7	7
VELOCITA'	40	30	30
PORTATA	35	35	35

Tabella 124 Risposte target primo processo di ottimizzazione

RISPOSTA	TARGET
CUT RATE	5,75
VD _w [%]	75,09
M1 [%]	77,27

Una volta individuate le risposte target si sono individuati i fattori che ottimizzano in simultanea i tre modelli e le relative risposte ottimizzate.

Tabella 125 Fattori e risposte ottimizzati primo processo di ottimizzazione

FATTORI	pressione	7	RISPOSTE	CUT RATE	5,63
	Velocità	40		VD _w [%]	68,9
	Portata	35		M1 [%]	75,45

Si è proceduto infine con il calcolo della desirability e della composite desirability attraverso le funzioni di desiderabilità proposte da Derringer e Suich (1980).

Tabella 126 Desirabilità e composite desirability primo processo di ottimizzazione

d _{CUT RATE}	0.804
d _{VD_w}	0,766
d _{M1}	0,769
D	0,779

7.5.1.1 confronto con il lavoro precedente

In quanto tale processo di ottimizzazione è stato realizzato in modo da poter ottenere dei risultati confrontabili con quelli relativi al lavoro precedente risulta opportuno riportare i risultati di tale lavoro in modo tale da poter realizzare tale confronto.

Tabella 127 Fattori e risposte ottimizzati lavoro precedente

FATTORI	pressione	7,5	RISPOSTE	CUT RATE	5,08
	Velocità	40		VDw [%]	89,02
	Portata	35		M1 [%]	86,94

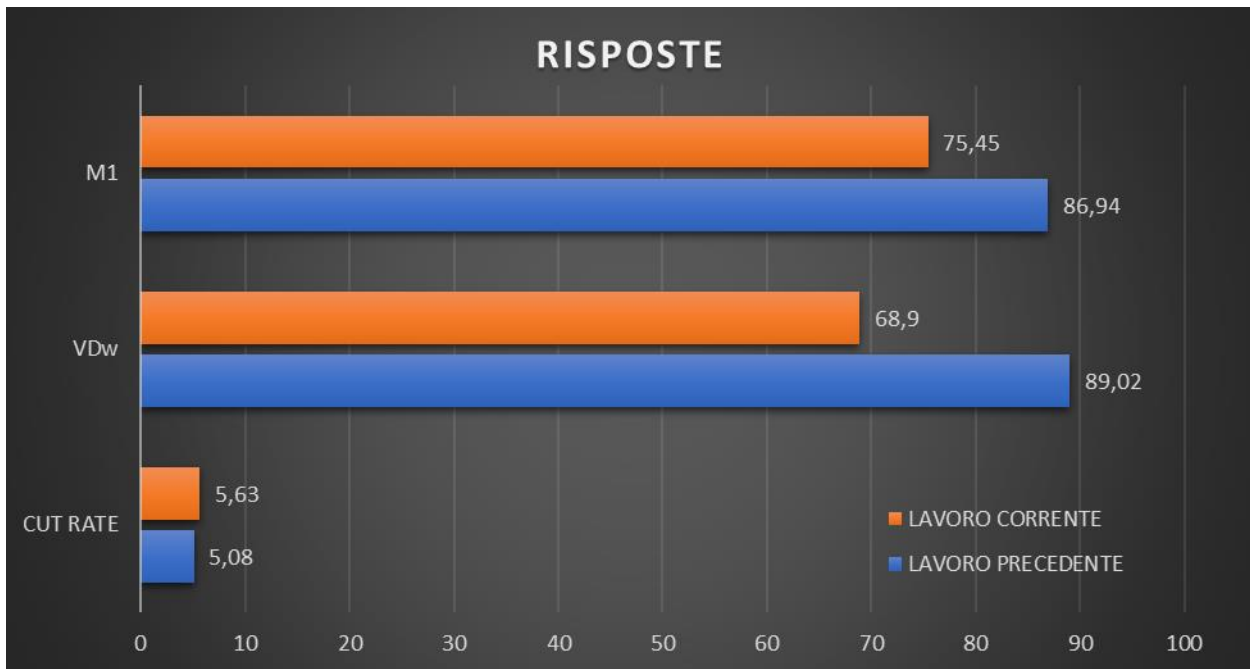


Figura 154 confronto risposte lavoro precedente e lavoro corrente primo processo di ottimizzazione

Come si può notare i fattori ottimizzati, ad eccezione della pressione, risultano essere gli stessi per entrambi i lavori. Si nota però come, ad eccezione del CUT RATE il quale risulta maggiore nel lavoro corrente, le risposte risultino essere peggiori rispetto al lavoro di tesi precedente. Ciò può essere imputato a diverse cause quali:

- Diametro delle sfere differente
- Macchina lappatrice studiata differente
- Intera linea di produzione differente
- Calcolo delle variazioni percentuali differenti

Vediamo a confronto anche le desirability e la composite desirability

Tabella 128 Desirability e composite desirability lavoro precedente

$d_{\text{CUT RATE}}$	0.804
d_{VDw}	1
d_{M1}	0,79
D	0,861

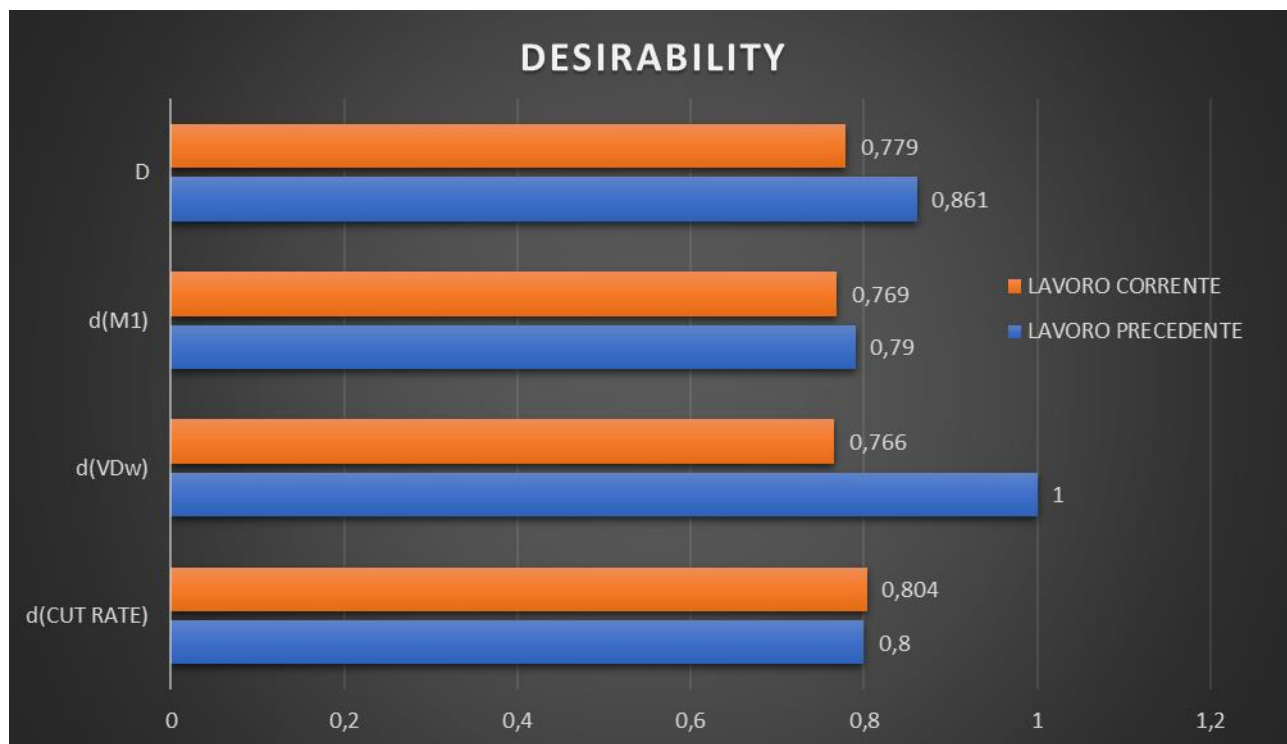


Figura 155 confronto desirability lavoro precedente e lavoro corrente primo processo di ottimizzazione

Come si può notare le desirability e la composite desirability, ad eccezione del VDw il quale risulta minore nel lavoro corrente, risultano essere molto simili.

7.5.2 Secondo processo di ottimizzazione

Nel secondo processo di ottimizzazione inseriamo dunque anche la risposta relativa alla rugosità. Come fatto per le precedenti risposte si individuano dunque i parametri che massimizzano tale risposta e la relativa risposta target.

Tabella 129 Fattori e risposta ottimizzati relativi alla sola rugosità

PRESSIONE [BAR]	VELOCITA' [RPM]	PORTATA [L/MIN]	Ra [%]
8	30	35	97,58

Si può dunque procedere all'ottimizzazione in simultanea dei 4 modelli.

Tabella 130 Fattori e risposte ottimizzati secondo processo di ottimizzazione

FATTORI	pressione	7	RISPOSTE	CUT RATE	5,63
	Velocità	40		VDw [%]	68,9
	Portata	35		M1 [%]	75,45
				Ra [%]	90,94

Tabella 131 Desirability e composite desirability secondo processo di ottimizzazione

$d_{\text{CUT RATE}}$	0,804
d_{VDw}	0,766
d_{M1}	0,769
d_{Ra}	0,939
D	0,815

Come si può notare i fattori che ottimizzano i 4 modelli in simultanea sono gli stessi che ottimizzano i 3 modelli nel primo processo di ottimizzazione. Di conseguenza le risposte e le desirability del CUT RATE, del VDw e del M1 risultano gli stessi mentre aumenta la composite desirability.

9. TEST SU SFERE DIAMETRO 17.462 SECONDA FASE

Nel seguente capitolo si riportano la totalità dei dati acquisiti durante la seconda campagna sperimentale. Come detto al termine del capitolo precedente si riporteranno i dati ottenuti organizzandoli con la stessa logica spiegata nel capitolo 5.3.1.

Il primo test effettuato in questo caso è il test 13 in quanto è il test con i parametri che più si allontanano da quelli standard. Tale test è stato dunque considerato un test critico e a seconda dei risultati di tale test si è valutato la fattibilità della seconda campagna sperimentale.

6.1 TEST 13

Tabella 132 Parametri TEST 13

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
5	36	40

Tabella 133 Tracciabilità TEST 13

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. Scarico
10/05/22	75	06517ZN	PREF	2	-4

Tabella 134 Diametro - attacco acido - temperatura TEST 13

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	-1,556		27
00:01	-2,404		
00:02	-3,333		
00:03	-4,1		
CUT RATE	2,544		

Tabella 135 Dati MWA TEST 13

PARAMETER		00:00	03:00	[%]	TOLLERANZE	
<i>Δr</i>	MAX	0,166	0,167	-0,60241	MAX	0,13
	MED	0,112	0,12	-7,14286	MED	
	MED+3S	0,188	0,193	-2,65957	X+3S	
<i>VDw</i>	MAX	0,304	0,307	-0,98684	MAX	0,13
	MED	0,186	0,206	-10,7527	MED	N/A
	MED+3S	0,336	0,363	-8,03571	X+3S	/
<i>L</i>	MAX	8,224	7,476	9,095331	MAX	5,4
	MED	4,822	5,301	-9,93364	MED	3,4
	MED+3S	9,433	9,662	-2,42765	X+3S	7,1
<i>M</i>	MAX	11,2	9,945	11,20536	MAX	7,1
	MED	6,884	7,403	-7,53922	MED	5,3
	MED+3S	12,03	12,02	0,083126	X+3S	9,5
<i>MI</i>	MAX	9,965	9,021	9,473156	MAX	3,8
	MED	5,347	6,098	-14,0453	MED	2,5
	MED+3S	10,91	10,86	0,458295	X+3S	5
<i>H</i>	MAX	12,43	14,42	-16,0097	MAX	16,5
	MED	10,72	12,49	-16,5112	MED	15,5
	MED+3S	14,26	16,25	-13,9551	X+3S	22

Tabella 136 Dati rugosimetro TEST 13

N° SFERA	00:00	03:00
1	0,0077	0,0095
2	0,0086	0,0129
3	0,0084	0,0099
4	0,0093	0,013
5	0,0082	0,0109
6	0,0081	0,009
7	0,0099	0,0108
8	0,0098	0,0084
9	0,0082	0,008
10	0,0074	0,0077
AVG [μm]	0,00856	0,01001
Ra [%]	-16,939	

Tabella 137 Variazioni percentuali TEST 13

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
2,544	-10,75	-14,04	-16,939

Come si può notare dalla tabella riassuntiva si hanno delle variazioni percentuali negative per le risposte relative ai parametri geometrici e alla rugosità. Si ha dunque un peggioramento di tali risposte a causa dei parametri di processo scelti. I risultati finali sono dunque estremamente lontani dai valori di tolleranza imposti dall'azienda come si può notare dai seguenti grafici.

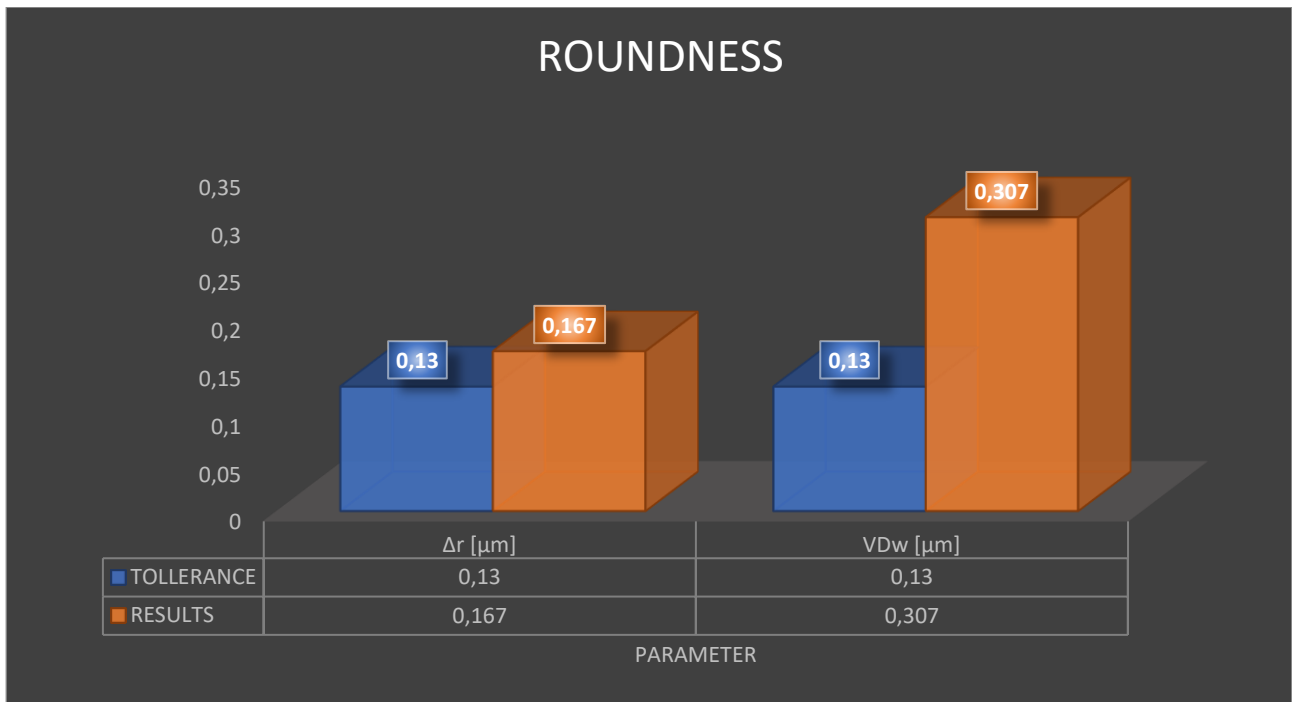


Figura 156 Tolleranze vs risultati roundness

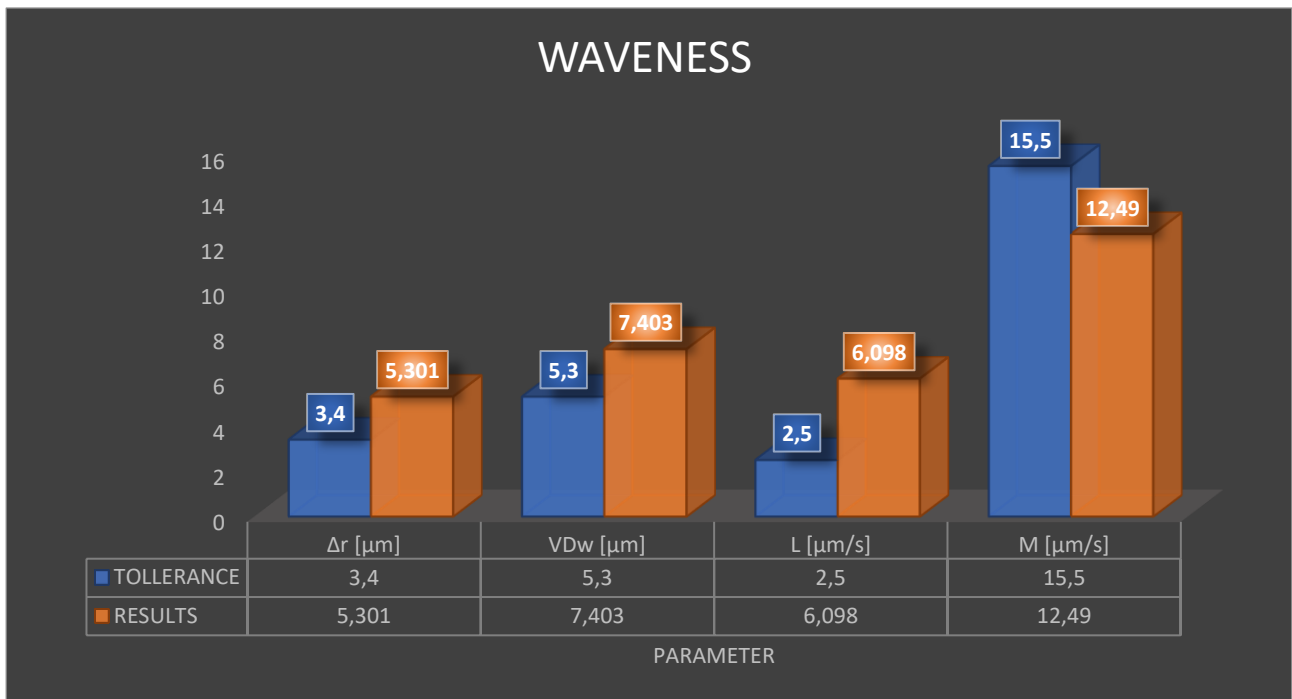


Figura 157 Tolleranze vs risultati waveness

A causa del test preliminare, bloccato a causa della presenza di grippature, e a causa dei risultati ottenuti in tale test si è deciso di bloccare la seconda campagna sperimentale. I parametri scelti dall'azienda risultano di fatto già i parametri di ottimo. Va inoltre considerato che gli operatori, specialmente durante la seconda fase, variano i parametri di pressione e portata in modo da fare da seguire il più possibile la road map. Si può dunque affermare che è la variazione dei parametri di processo che permette di ottenere le migliori risposte.

10. SFERE DIAMETRO 17.462 UNICA FASE

In quanto i test sperimentali condotti sulla seconda fase hanno dimostrato che la metodologia utilizzata in azienda rappresenta già la soluzione di ottimo, si è pensato di individuare un nuovo processo. Si è pensato dunque di eliminare la distinzione tra le due fasi e di andare a realizzare un processo composto da un'unica fase. Scopo di tale parte del lavoro di tesi è dunque quello di andare ad individuare un set di parametri che permetta tale processo. Per far ciò è stata abbandonata sia la tecnica del DOE sia l'analisi statistica tramite ANOVA. Si è voluto utilizzare la tecnica del (). In questo modo è possibile individuare i parametri di ottimo.

I livelli scelti per il primo test sono riportati nella seguente tabella. Si sono scelti questi valori in quanto, ad eccezione della portata, rappresentano il giusto compromesso tra la prima e la seconda fase. Si è inoltre scelta una portata di 40 l/MIN in quanto rappresenta il massimo valore di portata impostabile.

Tabella 138 Parametri Test A

Pressione [BAR]	Velocità [RPM]	Portata [l/MIN]
7	36	40

Tabella 139 Tracciabilità Test A

Data	Macchina	N° lotto	Provenienza	Mis. carico	Mis. Scarico
11/05/2022	75	06545ZN	PREF	10	4

Tabella 140 Diametro - attacco acido - temperatura TEST A

TIME	Dws (x) [μm]	Attacco acido	Temp. Refrigerante [$^{\circ}\text{C}$]
00:00	10,448	NO DIFETTI	27
00:01	8,92		
00:02	8,119	NO DIFETTI	
00:03	7,431		
00:04	6,69	NO DIFETTI	
00:05	5,89		
00:06	4,802	NO DIFETTI	
00:07	3,819		27,5
CUT RATE	6,629		

Tabella 141 Dati MWA TEST A

PARAMETER		00:00	00:01	00:02	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	[%]
<i>Δr</i>	MAX	1,834	0,503	0,394	0,259	0,183	0,165	0,15	0,204	88,87677
	MED	1,018	0,344	0,233	0,165	0,144	0,12	0,116	0,137	86,54224
	MED+3S	2,386	0,585	0,462	0,362	0,237	0,195	0,184	0,239	89,98324
<i>VD_w</i>	MAX	2,06	0,879	0,597	0,447	0,328	0,282	0,268	0,364	82,3301
	MED	1,502	0,566	0,341	0,266	0,227	0,2	0,187	0,244	83,75499
	MED+3S	2,793	1,043	0,728	0,603	0,385	0,327	0,341	0,438	84,31794
<i>L</i>	MAX	42,65	25,56	15,19	11,24	9,801	8,416	8,776	9,704	77,24736
	MED	29,43	16,64	9,034	6,745	6,772	5,438	4,411	5,822	80,21747
	MED+3S	61,53	31,48	17,51	14,63	12,45	11,44	10,71	12,29	80,026
<i>M</i>	MAX	59,86	24,44	14,69	13,75	8,428	10,54	9,513	10,48	82,49248
	MED	41,74	13,65	8,97	7,944	7,39	7,84	7,573	7,609	81,77048
	MED+3S	68,81	26,68	16,81	16,98	9,759	12,47	11,29	13,06	81,0202
<i>MI</i>	MAX	52,72	21,08	13,43	12,59	7,072	8,567	7,135	9,274	82,40895
	MED	28,64	10,26	7,069	5,838	5,183	5,976	5,499	5,753	79,91271
	MED+3S	62,33	23,37	15,87	15,37	8,694	10,51	8,522	12,16	80,49094
<i>H</i>	MAX	315,5	48,4	41,7	14,92	17,19	18,59	16,39	15,6	95,05547
	MED	205,9	32,91	19,66	13,66	13,77	12,5	14,43	14,3	93,05488
	MED+3S	379,8	61,34	44,95	17	20,41	22,31	17,69	17,91	95,28436

Tabella 142 Dati rugosimetro TEST A

N° SFERA	00:00	02:00	04:00	06:00
1	0,0957	0,0101	0,0083	0,014
2	0,0902	0,0095	0,0082	0,0134
3	0,145	0,0125	0,0088	0,0133
4	0,1169	0,01	0,0098	0,0079
5	0,0866	0,0085	0,0088	0,0148
6	0,11	0,0076	0,0106	0,0149
7	0,1218	0,0112	0,0081	0,0119
8	0,112	0,0097	0,0091	0,0136
9	0,1127	0,008	0,0112	0,0139
10	0,1078	0,0064	0,0071	0,0148
AVG [μm]	0,10987	0,00935	0,009	0,01325
Ra [%]	91,808			

Tabella 143 Variazioni percentuali TEST A

Cut Rate	VDw [%]	M1 [%]	Ra [%]
6,629	83,75499	79,91271	91,808

I risultati ottenuti da tale test hanno nuovamente dimostrato ciò che è stato ipotizzando al termine della prima e della seconda campagna sperimentale. Come si può infatti notare dai seguenti grafici si ottengono le migliori risposte intorno all'ora 04:00 ovvero il momento che nei precedenti test segnava la fine della prima fase e l'inizio della seconda.

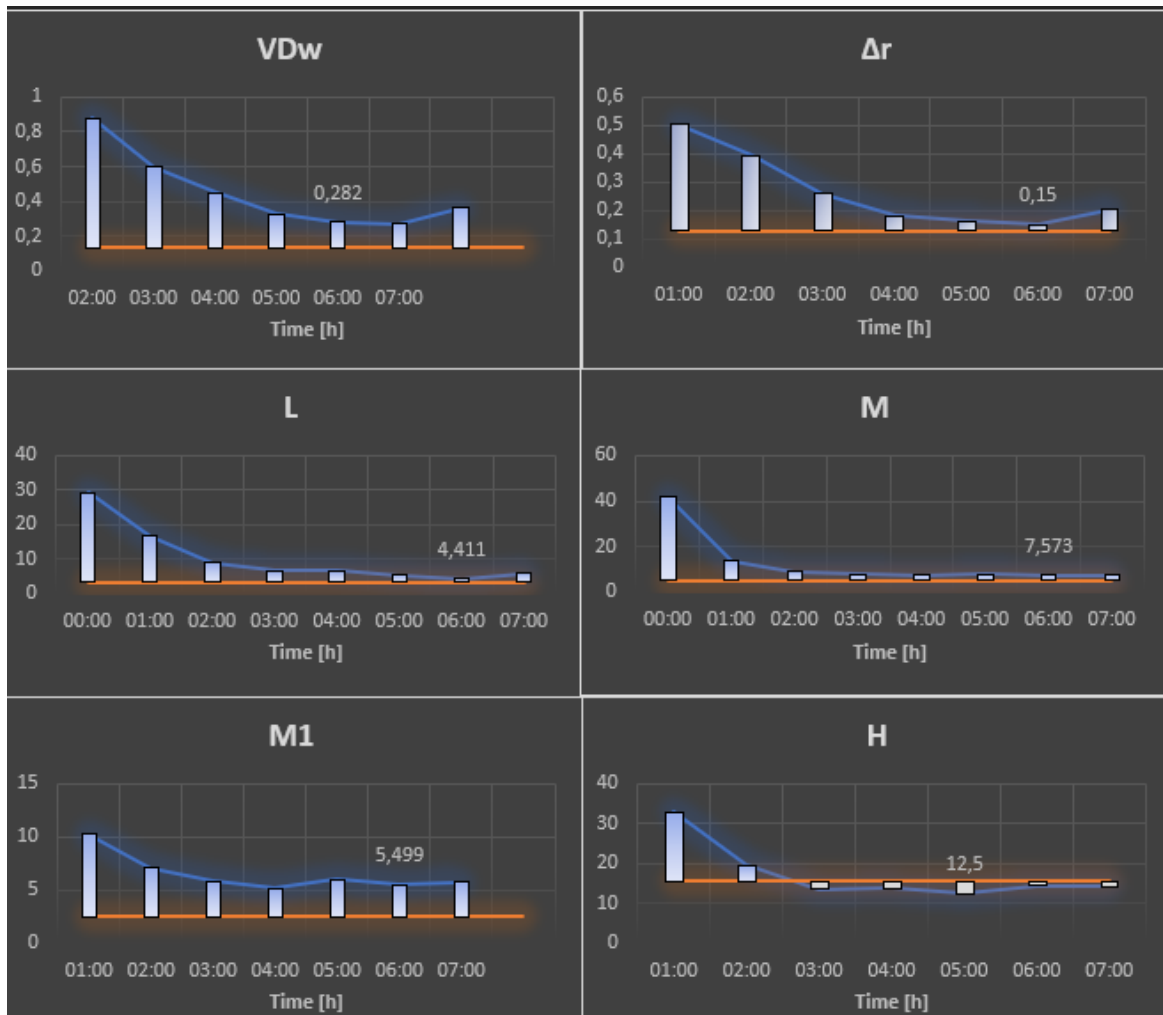


Figura 158 Andamento risposte waveness durante TEST A

Inoltre, i valori delle risposte studiate in questo lavoro di stesi sono simili a quelle previste dai modelli individuati, ad eccezione del CUT RATE. Si riporta nei seguenti grafici il confronto tra i risultati previsti dal modello e i risultati ottenuti al tempo 04:00. Si ricorda che per il VDw e M1 le variazioni percentuali sono state calcolate rispetto alle medie di tali valori all'ora 00:00 individuata nel capitolo 7.

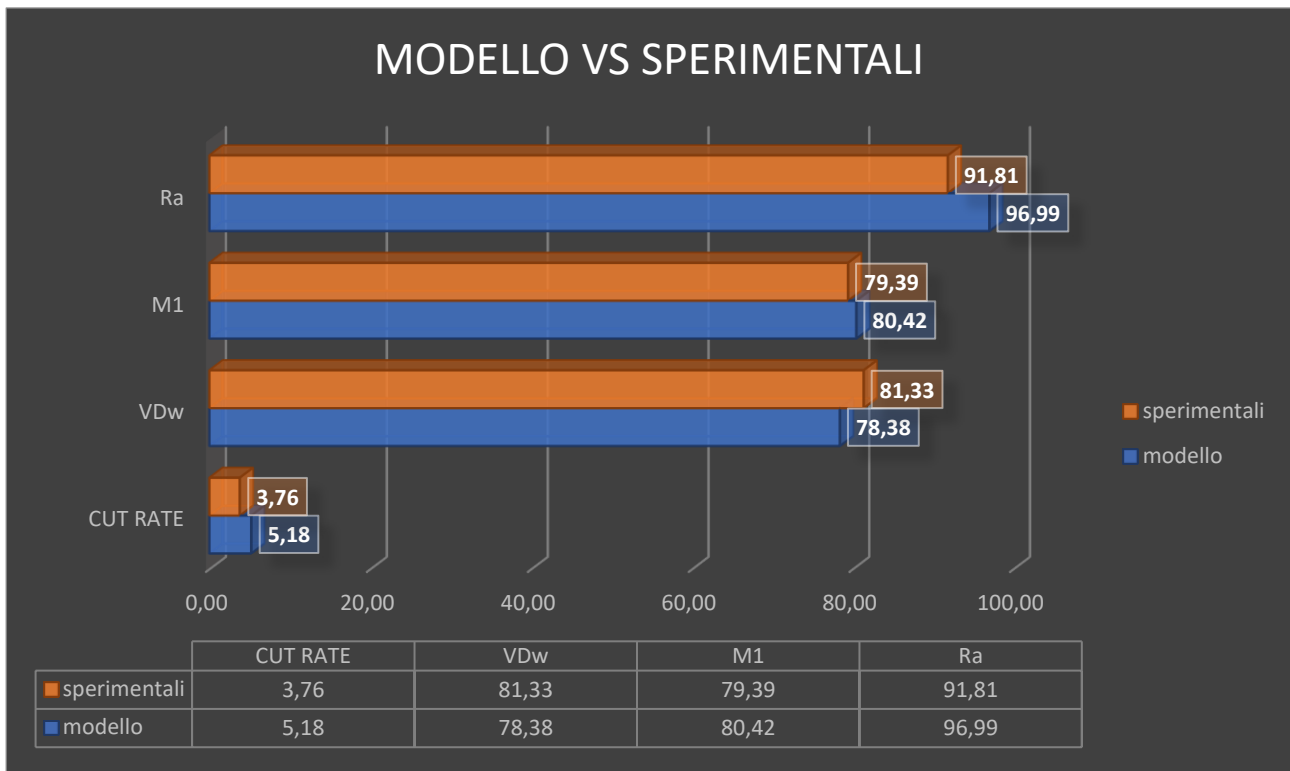


Figura 159 Grafico Modello vs risultati

Dall'ora 04:00 all'ora 07:00 si nota un peggioramento globale di tutti i parametri come previsto dai risultati ottenuti dalla seconda campagna sperimentale. Si dimostra dunque che nella seconda fase ciò che permette di ottenere una buona qualità dal punto di vista geometrico e della rugosità delle sfere non sono i valori dei parametri di processo di riferimento ma la variazione degli stessi da parte dell'operatore a seconda del lotto in lavorazione.

11. Conclusioni

L'utilizzo del *design of experiment* e della tecnica statistica dell *ANOVA* si sono dimostrate estremamente utili nella comprensione dell'effetto dei tre parametri di processo sulla qualità del prodotto sia al termine della prima fase della lappatura, sia sul prodotto finito.

Si sono realizzate tre campagne sperimentali in cui si è analizzato rispettivamente la prima e la seconda fase del processo e la possibilità di sostituire l'attuale ciclo di lavorazione con uno più semplice comprensivo di un'unica fase.

Nell'esecuzione delle prove sperimentali sono state utilizzate le combinazioni di parametri di processo previste da un piano sperimentale del tipo *Central composite Design* in modo da studiarne gli effetti sulla qualità del prodotto in uscita (ovalità, ondulosità, tasso di materiale asportato e rugosità superficiale).

A differenza del lavoro precedente, incentrato unicamente sulla prima fase di lappatura, si sono ottenuti modelli più semplici in cui non compaiono termini quadratici. Tale differenza può essere dovuta imputata a diverse cause:

- Nel precedente lavoro sono stati considerati come output la media delle risposte ottenute da due test. Nel lavoro corrente si è deciso invece di realizzare un unico test in modo da ridurre i tempi della campagna sperimentale e di eventuali successive analisi. Ciò ha però esposto i risultati ad una maggiore sensibilità a fattori di disturbo non controllabili andando a mitigare gli effetti delle prove.
- Nel lavoro corrente si è notata un'elevata variabilità della qualità delle sfere al tempo 00:00 delle prove sperimentali. Ciò ha imposto il calcolo delle variazioni percentuali delle risposte rispetto alla media delle caratteristiche di queste ultime al tempo 00:00. Tale variabilità può dunque essere causa di una mitigazione dei risultati e dunque dei modelli meno complessi
- Il precedente lavoro ha avuto come oggetto di studio sfere dal diametro di 15,875 mm. Lo studio corrente si è invece concentrato su sfere dal diametro di 17,462 mm. La lavorazione di sfere dal diametro maggiore è meno sensibile alla variazione dei parametri di processo e dunque le risposte sono prevedibili attraverso modelli più semplici rispetto a sfere del diametro minore. Tale studio può dunque proseguire su sfere di diametro ancora maggiore in modo da ottenere modelli più semplici oppure su sfere dal diametro minore in modo da ottenere modelli più complessi.

Nello studio della prima fase del processo è emerso che la velocità di rotazione della mola ha un'elevata influenza sul *Cut rate* rispetto alla pressione o alla portata. Ciò va a confermare quanto visto nel lavoro precedente su tale risposta.

La velocità di rotazione della mola è risultata la variabile di processo più significativa anche per l'ovalità della sfera. Tale situazione va a smentire quanto visto nel lavoro precedente in cui il fattore più significativo risultava essere la portata di lubro-refrigerante.

Per quanto riguarda invece l'ondulosità della superficie della sfera il parametro di processo più significativo è la portata di lubro-refrigerante, in accordo con quanto visto nel lavoro precedente.

Il modello ottenuto per prevedere l'indice di rugosità superficiale è risultato il più complesso e vede come parametro più significativo la portata di lubro-refrigerante analogamente alla risposta relativa all'ondulosità della sfera. Si nota come anche la pressione e la velocità di rotazione della mola

influiscono in maniera molto simile sulle due risposte. Ciò è dovuto al fatto che le due risposte sono legate alla superficie della sfera.

Obiettivo del lavoro precedente e della prima campagna sperimentale del lavoro corrente è quello dell'ottimizzazione delle risposte in esame massimizzando la variazione percentuale di queste ultime tra l'istante 00:00 e l'istante 04:00. In quanto i tre parametri di processo hanno influenza differente sulle risposte in esame è dunque necessario individuare dei parametri di ottimo, i quali risultino un compromesso dei parametri che ottimizzino le singole risposte. Nonostante le sostanziali differenze individuate tra i modelli del lavoro precedente e i modelli del lavoro i parametri di ottimo individuati sono estremamente simili. Ciò è stato visto come una validazione sia della bontà del lavoro precedente, sia come una validazione della bontà del lavoro corrente.

La seconda campagna sperimentale è stata interrotta dopo pochi test in quanto si è ottenuta una qualità della sfera ben lontana da quella imposta dalle tolleranze interne all'azienda. Ciò può essere dovuto all'impossibilità di variazione dei parametri di processo di pressione e portata durante il test. Ad oggi, infatti, l'operatore va a variare tali parametri durante la lavorazione in modo da seguire il più possibile la Road Map. Tale azione avrebbe falsato però la campagna sperimentale. Si dimostra dunque che nell'ottenimento di una buona qualità del prodotto finito risulta più importante l'adattamento dei parametri di processo al lotto in lavorazione più che l'utilizzo di parametri di processo fissi, i quali possono però essere utilizzati come punto di partenza della lavorazione.

La terza campagna sperimentale ha visto la realizzazione di un'unica prova sperimentale. Durante tale prova si è visto un *trend* molto simile delle varie risposte. Queste si sono di fatti avvicinate alle tolleranze interne all'azienda nella prima parte della prova. Nella seconda parte invece si è visto che queste hanno avuto un andamento random oscillando rispetto al valore minimo ottenuto al termine della prima parte dimostrando una non stabilità del processo. Si vuole inoltre far notare che l'istante che divide le due parti della prova è in prossimità dell'istante di tempo che divide le due fasi nel ciclo attualmente utilizzato in azienda. Ciò dimostra dunque la necessità dell'utilizzo delle due fasi nel processo di lappatura rendendo dunque impossibile l'utilizzo di un ciclo di produzione ad un'unica fase.

Osservando nella totalità le tre campagne sperimentali si può notare come risulti poco significativa la qualità ottenuta nella prima fase del processo in quanto è la seconda fase quella che determina la qualità finale del prodotto. Risulta dunque conveniente andare a velocizzare il più possibile la prima fase anche a scapito di ottenere al termine di tale fase una qualità più bassa rispetto agli standard.

12. APPENDICE

12.1 ANALISI PRIMA FASE LAPPATURA SFERE 17,462 SOFTWARE MINITAB

In questo capitolo si riporta l'analisi della prima fase del processo di lappatura per le sfere dal diametro di 17,462 mm. La metodologia seguita per la realizzazione di tale analisi è già stata ampiamente spiegata sia nel capitolo 3 di questo lavoro di tesi, sia nel lavoro di tesi precedente "Influenza dei parametri di processo nell'operazione di lappatura delle sfere per cuscinetti: Design of Experiment (DOE) e analisi statistica". Per tale motivo si riporteranno solo i punti salienti e i risultati relativi a tale analisi. Verrà inoltre realizzato un confronto tra i risultati ottenuti con il software Minitab e i risultati ottenuti attraverso il software Rstudio riportati nel capitolo 7 del lavoro di tesi corrente.

Tabella 144 Piano sperimentale prima fase lappatura sfere 17,462

+	C4	C5	C6	C7	C8 <input checked="" type="checkbox"/>	C9 <input checked="" type="checkbox"/>	C10 <input checked="" type="checkbox"/>	C11 <input checked="" type="checkbox"/>
	Blocks	pressione	velocità	portata	VDw	M1	CUTRATE	Ra
1	1	7,0	30	20,0	71,267	74,228	4,591	80,346
2	1	8,0	30	20,0	66,458	70,622	4,358	89,535
3	1	7,0	40	20,0	63,572	68,236	5,106	89,033
4	1	8,0	40	20,0	53,714	67,699	5,560	89,276
5	1	7,0	30	35,0	70,185	77,561	4,783	91,478
6	1	8,0	30	35,0	72,950	74,725	4,604	90,645
7	1	7,0	40	35,0	72,950	77,775	5,949	91,660
8	1	8,0	40	35,0	63,452	73,290	5,688	86,984
9	1	7,0	35	27,5	73,551	72,145	4,587	82,578
10	1	8,0	35	27,5	68,862	71,648	5,360	89,606
11	1	7,5	30	27,5	69,103	70,339	4,376	85,315
12	1	7,5	40	27,5	65,376	71,509	5,857	89,071
13	1	7,5	35	20,0	65,015	70,920	4,956	87,036
14	1	7,5	35	35,0	66,458	75,684	4,863	89,166
15	1	7,5	35	27,5	65,376	74,706	4,564	86,861
16	1	7,5	35	27,5	61,048	68,276	5,097	86,899

Si riporta inizialmente il piano sperimentale realizzato da Minitab stesso attraverso l'apposita funzione. Si riporta direttamente il piano sperimentale completo delle risposte ottenute dai vari test.

Si riporta ora l'analisi vera e propria seguendo lo stesso schema seguito per l'analisi su Rstudio nel capitolo 7. A fianco di ogni tabella ottenuta con Minitab verrà riportata la rispettiva tabella ottenuta attraverso Rstudio in modo da poter realizzare facilmente un confronto.

12.1.1 modello CUT RATE

Si riporta la tabella dell'ANOVA ottenuta considerando prima la totalità dei fattori ed in seguito i soli fattori più rilevanti.

Tabella 145 ANOVA considerando la totalità dei fattori Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) CUT RATE

CUT RATE						Analysis of Variance					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
FO (x1, x2, x3)	3	3,1719	1,05732	9,2811	0,01135	Model	9	3,43722	0,38191	3,35	0,077
I (x1*x2)	1	0,0458	0,04575	0,4016	0,54963	Linear	3	3,17195	1,05732	9,28	0,011
I (x1*x3)	1	0,0546	0,05462	0,4794	0,51458	pressione	1	0,03069	0,03069	0,27	0,622
I (x2*x3)	1	0,0355	0,03551	0,3117	0,59683	velocità	1	2,96807	2,96807	26,05	0,002
TWI (x1, x2, x3)	3	0,1359	0,04529	0,3976	0,75987	portata	1	0,17319	0,17319	1,52	0,264
I (x1^2)	1	0,0425	0,04248	0,3729	0,56383	Square	3	0,12939	0,04313	0,38	0,772
I (x2^2)	1	0,0848	0,08484	0,7447	0,4213	pressione*pressione	1	0,00341	0,00341	0,03	0,868
I (x3^2)	1	0,0021	0,00207	0,0182	0,89719	velocità*velocità	1	0,08446	0,08446	0,74	0,422
PQ (x1, x2, x3)	3	0,1294	0,04313	0,3786	0,77223	portata*portata	1	0,00207	0,00207	0,02	0,897
Residuals	6	0,6835	0,11392			2-Way Interaction	3	0,13588	0,04529	0,40	0,760
Lack of fit	5	0,5415	0,1083	0,7624	0,69606	pressione*velocità	1	0,04575	0,04575	0,40	0,550
Pure error	1	0,142	0,142			pressione*portata	1	0,05462	0,05462	0,48	0,515
						velocità*portata	1	0,03551	0,03551	0,31	0,597
						Error	6	0,68353	0,11392		
						Lack-of-Fit	5	0,54148	0,10830	0,76	0,696
						Pure Error	1	0,14204	0,14204		
						Total	15	4,12075			

Tabella 146 ANOVA considerando fattori più significativi Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) CUT RATE

CUT RATE						Analysis of Variance					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
FO (x1, x2, x3)	3	3,1719	1,05732	13,3725	0,0003914	Model	3	3,17195	1,05732	13,37	0,000
Residuals	12	0,9488	0,07907			Linear	3	3,17195	1,05732	13,37	0,000
Lack of fit	11	0,8068	0,07334	0,5163	0,8084785	pressione	1	0,03069	0,03069	0,39	0,545
Pure error	1	0,142	0,142			velocità	1	2,96807	2,96807	37,54	0,000
						portata	1	0,17319	0,17319	2,19	0,165
						Error	12	0,94880	0,07907		
						Lack-of-Fit	11	0,80676	0,07334	0,52	0,808
						Pure Error	1	0,14204	0,14204		
						Total	15	4,12075			

Come si può facilmente notare le differenze ottenute dai due output sono compatibili con le differenze rilevate nel capitolo 3.

Si procede dunque con l'individuazione dei coefficienti del modello in modo da individuare il peso di tali differenze.

Tabella 147 Coefficienti modello Rstudio (sopra) e Minitab (sotto) CUT RATE

CUT RATE				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)	-0,10845	1,509195	-0,0719	0,9439
Pressione	0,1108	0,177839	0,623	0,5449
Velocità	0,10896	0,017784	6,1269	5,123E-05
Portata	0,017547	0,011856	1,48	0,1646

Regression Equation in Uncoded Units

CUTRATE = -0,11 + 0,111 pressione + 0,1090 velocità + 0,0175 portata

Come individuato nel capitolo 3 si conferma che le differenze tra i due output non sono rilevanti in quanto le equazioni di regressione individuate sono le stesse a meno del numero di cifre significative.

In quanto sia le tabelle dell'ANOVA sia i modelli trovati suggeriscono le stesse conclusioni individuate al termine del capitolo 3 si evita di riportare i grafici relativi alla terza parte dell'analisi. Tali grafici vanno infatti a confermare la bontà del modello, esattamente come i grafici individuati nel capitolo nel 7.

Analogamente verrà omessa anche la quarta parte dell'analisi ovvero quella relativa all'ottimizzazione dei parametri essendo i modelli individuati identici.

12.1.2 Modello Vdw

Tabella 148 ANOVA considerando la totalità dei fattori Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) VDw

VDw						Analysis of Variance					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
FO (x1, x2, x3)	3	230,977	76,992	7,4974	0,01874	Model	9	333,990	37,1100	3,61	0,066
I (x1*x2)	1	37,463	37,463	3,6481	0,10471	Linear	3	230,977	76,9924	7,50	0,019
I (x1*x3)	1	7,869	7,869	0,7662	0,41505	pressione	1	68,064	68,0636	6,63	0,042
I (x2*x3)	1	23,482	23,482	2,2866	0,18125	velocità	1	95,475	95,4748	9,30	0,023
TWI (x1, x2, x3)	3	68,814	22,938	2,2337	0,18487	portata	1	67,439	67,4389	6,57	0,043
I (x1^2)	1	19,839	19,839	1,931	0,21392	Square	3	34,199	11,3996	1,11	0,416
I (x2^2)	1	3,789	3,789	0,369	0,56583	pressione*pressione	1	31,700	31,7004	3,09	0,129
I (x3^2)	1	10,571	10,571	1,0294	0,34946	velocità*velocità	1	0,658	0,6575	0,06	0,809
PQ (x1, x2, x3)	3	34,199	11,4	1,1101	0,41572	portata*portata	1	10,571	10,5707	1,03	0,349
Residuals	6	61,615	10,269			2-Way Interaction	3	68,814	22,9378	2,23	0,185
Lack of fit	5	52,249	10,45	1,1157	0,61274	pressione*velocità	1	37,463	37,4632	3,65	0,105
Pure error	1	9,366	9,366			pressione*portata	1	7,869	7,8685	0,77	0,415
						velocità*portata	1	23,482	23,4818	2,29	0,181
						Error	6	61,615	10,2692		
						Lack-of-Fit	5	52,249	10,4498	1,12	0,613
						Pure Error	1	9,366	9,3658		
						Total	15	395,605			

Tabella 149 ANOVA considerando fattori più significativi Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) VDw

VDw						Analysis of Variance					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
FO (x1, x2, x3)	3	230,977	76,992	5,6121	0,01221	Model	3	230,977	76,992	5,61	0,012
Residuals	12	164,627	13,719			Linear	3	230,977	76,992	5,61	0,012
Lack of fit	11	155,262	14,115	1,507	0,56741	pressione	1	68,064	68,064	4,96	0,046
Pure error	1	9,366	9,366			velocità	1	95,475	95,475	6,96	0,022
						portata	1	67,439	67,439	4,92	0,047
						Error	12	164,627	13,719		
						Lack-of-Fit	11	155,262	14,115	1,51	0,567
						Pure Error	1	9,366	9,366		
						Total	15	395,605			

Tabella 150 Coefficienti modello Rstudio (sopra) e Minitab (sotto) VDw

VDw					
		Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)		118,0744	19,87966	5,9395	6,82E-05
x1		-5,2178	2,34256	-2,2274	0,04583
x2		-0,61798	0,23426	-2,6381	0,02165
x3		0,3465	0,15617	2,2171	0,04668

Regression Equation in Uncoded Units

$$VDw = 118,1 - 5,22 \text{ pressione} - 0,618 \text{ velocità} + 0,346 \text{ portata}$$

Nuovamente le differenze ottenute dai due output sono compatibili con le differenze rilevate nel capitolo 3.

Si conferma che le differenze tra i due output non sono rilevanti in quanto le equazioni di regressione individuate sono le stesse a meno del numero di cifre significative.

12.1.3 Modello M1

Tabella 151 ANOVA considerando la totalità dei fattori Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) M1

M1					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO (x1, x2, x3)	3	97,038	32,346	6,1612	0,02907
I (x1*x2)	1	0,252	0,252	0,048	0,83383
I (x1*x3)	1	1,262	1,262	0,2405	0,64128
I (x2*x3)	1	7,4	7,4	1,4095	0,28001
TWI (x1, x2, x3)	3	8,914	2,971	0,566	0,65729
I (x1^2)	1	2,952	2,952	0,5623	0,4817
I (x2^2)	1	0,01	0,01	0,0019	0,96675
I (x3^2)	1	8,165	8,165	1,5553	0,25882
PQ (x1, x2, x3)	3	11,127	3,709	0,7065	0,58225
Residuals	6	31,5	5,25		
Lack of fit	5	10,827	2,165	0,1048	0,97283
Pure error	1	20,672	20,672		

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	117,080	13,0089	2,48	0,141
Linear	3	97,038	32,3461	6,16	0,029
pressione	1	14,307	14,3066	2,73	0,150
velocità	1	8,039	8,0389	1,53	0,262
portata	1	74,693	74,6929	14,23	0,009
Square	3	11,127	3,7091	0,71	0,582
pressione*pressione	1	0,331	0,3311	0,06	0,810
velocità*velocità	1	1,007	1,0072	0,19	0,677
portata*portata	1	8,165	8,1654	1,56	0,259
2-Way interaction	3	8,914	2,9714	0,57	0,657
pressione*velocità	1	0,252	0,2521	0,05	0,834
pressione*portata	1	1,262	1,2625	0,24	0,641
velocità*portata	1	7,400	7,3997	1,41	0,280
Error	6	31,500	5,2500		
Lack-of-Fit	5	10,827	2,1655	0,10	0,973
Pure Error	1	20,672	20,6725		
Total	15	148,580			

Tabella 152 ANOVA considerando fattori più significativi Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) M1

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO (x1, x2, x3)	3	97,038	32,346	7,5309	0,004282
Residuals	12	51,541	4,295		
Lack of fit	11	30,869	2,806	0,1357	0,979859
Pure error	1	20,672	20,672		

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	97,038	32,346	7,53	0,004
Linear	3	97,038	32,346	7,53	0,004
pressione	1	14,307	14,307	3,33	0,093
velocità	1	8,039	8,039	1,87	0,196
portata	1	74,693	74,693	17,39	0,001
Error	12	51,541	4,295		
Lack-of-Fit	11	30,869	2,806	0,14	0,980
Pure Error	1	20,672	20,672		
Total	15	148,580			

Nuovamente le differenze ottenute dai due output sono compatibili con le differenze rilevate nel capitolo 3.

Si conferma che le differenze tra i due output non sono rilevanti in quanto le equazioni di regressione individuate sono le stesse a meno del numero di cifre significative.

M1					
		Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)		86,65688	11,12335	7,7905	4,98E-06
x1		-2,3922	1,310742	-1,8251	0,092968
x2		-0,17932	0,131074	-1,3681	0,196359
x3		0,3644	0,087383	4,1702	0,001299

Regression Equation in Uncoded Units

M1: $Y = 86,65688 - 2,3922 \text{ pressione} - 0,17932 \text{ velocità} + 0,3644 \text{ portata}$

12.1.4 Modello Ra

Ra						Analysis of Variance					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
FO (x1, x2, x3)	3	41,2	13,7332	3,9043	0,073365	Model	9	120,788	13,4209	3,82	0,059
I (x1*x2)	1	20,445	20,445	5,8123	0,052511	Linear	3	41,200	13,7332	3,90	0,073
I (x1*x3)	1	27,904	27,904	7,933	0,030492	pressione	1	11,992	11,9924	3,41	0,114
I (x2*x3)	1	17,722	17,722	5,0383	0,065928	velocità	1	7,578	7,5777	2,15	0,193
TWI (x1, x2, x3)	3	66,071	22,0237	6,2612	0,028069	portata	1	21,630	21,6296	6,15	0,048
I (x1^2)	1	1,959	1,959	0,5569	0,4837	Square	3	13,518	4,5059	1,28	0,363
I (x2^2)	1	4,536	4,536	1,284	0,299465	pressione*pressione	1	0,374	0,3744	0,11	0,755
I (x3^2)	1	7,023	7,023	1,9966	0,207366	velocità*velocità	1	1,383	1,3825	0,39	0,554
PQ (x1, x2, x3)	3	13,518	4,509	1,281	0,363013	portata*portata	1	7,023	7,0231	2,00	0,207
Residuals	6	21,105	3,5175			2-Way Interaction	3	66,071	22,0237	6,26	0,028
Lack of fit	5	21,104	4,2208	5846,052	0,009929	pressione*velocità	1	20,445	20,4448	5,81	0,053
Pure error	1	0,001	0,0007			pressione*portata	1	27,904	27,9042	7,93	0,030
						velocità*portata	1	17,722	17,7221	5,04	0,066
						Error	6	21,105	3,5175		
						Lack-of-Fit	5	21,104	4,2208	5846,05	0,010
						Pure Error	1	0,001	0,0007		
						Total	15	141,893			

Tabella 153 ANOVA considerando la totalità dei fattori Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) Ra

Ra						Analysis of Variance					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
FO (x1, x2, x3)	3	41,2	13,7332	3,5699	0,060063	Model	6	107,271	17,8785	4,65	0,020
I (x1*x2)	1	20,445	20,4448	5,3145	0,046591	Linear	3	41,200	13,7332	3,57	0,060
I (x1*x3)	1	27,904	27,9042	7,2536	0,024665	pressione	1	11,992	11,9924	3,12	0,111
I (x2*x3)	1	17,7722	17,7221	4,6068	0,060395	velocità	1	7,578	7,5777	1,97	0,194
TWI (x1, x2, x3)	3	66,071	22,0237	5,725	0,017963	portata	1	21,630	21,6296	5,62	0,042
Residuals	9	34,623	3,847			2-Way Interaction	3	66,071	22,0237	5,72	0,018
Lack of fit	8	34,623	4,3277	5994,102	0,009989	pressione*velocità	1	20,445	20,4448	5,31	0,047
Pure error	1	0,001	0,0007			pressione*portata	1	27,904	27,9042	7,25	0,025
						velocità*portata	1	17,722	17,7221	4,61	0,060
						Error	9	34,623	3,8470		
						Lack-of-Fit	8	34,622	4,3277	5994,10	0,010
						Pure Error	1	0,001	0,0007		
						Total	15	141,893			

Tabella 154 ANOVA considerando fattori più significativi Rstudio (sinistra) e Minitab (destra) M1

Anche per quanto riguarda la risposta relativa alla rugosità le differenze ottenute dai due output sono compatibili con le differenze rilevate nel capitolo 3.

Ra					
		Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)		-248,846	84,757487	-2,936	1,66E-02
x1		38,26687	11,029482	3,4695	0,007054
x2		6,06145	2,145185	2,8256	0,019864
x3		5,320493	1,532714	3,4713	0,007034
I (x1*x2)		-0,63945	0,277379	-2,3035	0,046591
I (x1*x3)		-0,49803	0,184919	-2,6932	0,024665
I (x2*x3)		-0,03969	0,018492	-2,1463	0,060395

Regression Equation in Uncoded Units

Ra = -248,8 + 38,3 pressione + 6,06 velocità + 5,32 portata - 0,639 pressione*velocità - 0,498 pressione*portata - 0,0397 velocità*portata

Figura 161 Coefficienti modello Rstudio (sopra) e Minitab (sotto) Ra

Si conferma che le differenze tra i due output non sono rilevanti in quanto le equazioni di regressione individuate sono le stesse a meno del numero di cifre significative.

12.2 ANALISI IN UNITA' CODIFICATE PRIMA FASE LAPPATURA 17,462

Le differenze tra l'analisi in unità codificate e l'analisi in unità non codificate sono riferite solamente ai coefficienti dell'equazione di regressione. Verranno riportate solamente le tabelle dei coefficienti relative a tale analisi. La metodologia con cui sono state individuate tali tabelle è già stata ampiamente discussa nel capitolo 3 del corrente lavoro di tesi.

Si riportano per prime le tabelle relative all'analisi condotta sulla totalità dei fattori e per seconde le tabelle associate all'analisi condotta sui soli fattori più significativi.

12.2.1 Analisi codificata sulla totalità dei fattori

- CUT RATE

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)	4,901845	0,15974	30,676	7,966E-08
x1	0,0554	0,106734	0,519	0,622309
x2	0,5448	0,106734	5,1043	0,002212
x3	0,1316	0,106734	1,233	0,2637
I (x1*x2)	0,075625	0,119332	0,6337	0,549634
I (x1*x3)	-0,08265	0,119332	-0,6924	0,514579
I (x2*x3)	0,066625	0,119332	0,5583	0,596832
I (x1^2)	0,035983	0,207874	0,1731	0,868266
I (x2^2)	0,178983	0,207874	0,861	0,422298
I (x3^2)	-0,028017	0,207874	-0,1348	0,897194

Tabella 155 Tabella dei coefficienti analisi codificata CUT RATE

- VDw

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)	66,22993	1,51714	43,6545	9,673E-09
x1	-2,6089	1,01337	-2,5745	0,04208
x2	-3,0899	1,01337	-3,0491	0,02254
x3	2,5969	1,01337	2,5626	0,04276
I (x1*x2)	-2,164	1,13298	-1,91	0,10471
I (x1*x3)	0,99175	1,13298	0,8753	0,41505
I (x2*x3)	1,71325	1,13298	1,5122	0,18125
I (x1^2)	3,4676	1,97362	1,757	0,12944
I (x2^2)	-0,4994	1,97362	-0,253	0,80869
I (x3^2)	-2,0024	1,97362	-1,0146	0,34936

Tabella 156 Tabella dei coefficienti analisi codificata VDw

- M1

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)	71,52507	1,08477	65,9359	8,185E-10
x1	-1,1961	0,72457	-1,6508	0,149875
x2	-0,8966	0,72457	-1,2374	0,262155
x3	2,733	0,72457	3,7719	0,009268
I (x1*x2)	0,1775	0,81009	0,2191	0,833827
I (x1*x3)	-0,39725	0,81009	-0,4904	0,641282
I (x2*x3)	0,96175	0,81009	1,1872	0,280011
I (x1^2)	0,3544	1,41116	0,2511	0,810086
I (x2^2)	-0,6181	1,41116	-0,438	0,676707
I (x3^2)	1,7599	1,41116	1,2471	0,258823

Tabella 157 Tabella dei coefficienti analisi codificata M1

- Ra

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)	71,52507	1,08477	65,9359	8,19E-10
x1	-1,1961	0,72457	-1,6508	0,149875
x2	-0,8966	0,72457	-1,2374	0,262155
x3	2,733	0,72457	3,7719	0,009268
I (x1*x2)	0,1775	0,81009	0,2191	0,833827
I (x1*x3)	-0,39725	0,81009	-0,4904	0,641282
I (x2*x3)	0,96175	0,81009	1,1872	0,280011
I (x1^2)	0,3544	1,41116	0,2511	0,810086
I (x2^2)	-0,6181	1,41116	-0,438	0,676707
I (x3^2)	1,7599	1,41116	1,2471	0,258823

Tabella 158 Tabella dei coefficienti analisi codificata Ra

12.2.2 Analisi codificata sui fattori più significativi

- CUT RATE

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)	5,018688	0,070297	71,3926	2,2E-16
x1	0,0554	0,088919	0,623	0,5449
x2	0,5448	0,088919	6,1269	5,123E-05
x3	0,1316	0,088919	1,48	0,1646

Tabella 159 Tabella dei coefficienti analisi codificata CUT RATE

- VDw

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)	66,83356	0,9258	72,1762	2E-16
x1	-2,6089	1,17128	-2,2274	0,04583
x2	-3,0899	1,17128	-2,6381	0,02165
x3	2,5969	1,17128	2,2171	0,04668

Tabella 160 Tabella dei coefficienti analisi codificata VDw

- M1

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)	72,46019	0,51812	139,8532	2,2E-16
x1	-1,1961	0,65537	-1,8251	0,092968
x2	-0,8966	0,65537	-1,3681	0,196359
x3	2,733	0,65537	4,1702	0,001299

Tabella 161 Tabella dei coefficienti analisi codificata M1

- Ra

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(intercept)	87,843	0,49034	179,15	2E-16
x1	1,0951	0,6024	1,7656	0,112
x2	0,8705	0,6024	1,4035	0,194
x3	1,4707	0,6024	2,3712	0,0418
I (x1*x2)	-1,5986	0,6935	-2,305	0,0465
I (x1*x3)	-1,8676	0,6935	-2,693	0,0247
I (x2*x3)	-1,4884	0,6935	-2,146	0,0604

Tabella 162 Tabella dei coefficienti analisi codificata Ra

Bibliografia

- [1]. *D'Attila, G. "Influenza dei parametri di processo nell'operazione di lappatura delle sfere per cuscinetti: Design of experiment (DOE) e analisi statistica"*. Tesi, Politecnico di Torino, 2021.
- [2]. *D. S. Del Rosso, "STUDIO DELLA OPERAZIONE DI LAPPATURA NELLA PRODUZIONE DI SFERE IN ACCIAIO"*. Tesi, Politecnico di Torino, 2019.
- [3]. *Wikipedia*. ". <https://it.wikipedia.org/wiki/Lappatura>".
- [4]. *cpgrinding*. ". <https://www.cpgrinding.com/it/approfondimenti/cose-la-lappatura>".
- [5]. *logicbid*. ". <https://www.logicbid.com/blog/lappatura-metalli>".
- [6]. *Douglas C. Montgomery, "Progettazione e analisi degli esperimenti"*. McGraw-Hill, 2005.
- [7]. *Douglas C. Montgomery, "Controllo statistico della qualità"*. McGraw-Hill, 2006.
- [8]. *G. Vicario, R. Levi, "Metodi Statistici per la sperimentazione"*. Bologna: Progetto Leonardo, 2008.
- [9]. «9. R.L.J. Coetzer, L.M. Haines, L.P. Fatti, "Central composite designs for estimating the optimum conditions for a second-order model", Ping Zao.» 2009.
- [10]. «A Novel Lapping Method for High Precision Balls Based on Variable-Radius V Groove.» 2013.
- [11]. «ISO 3290:1998, Rolling Bearings-Balls-Dimensions and Tolerances .» s.d.
- [12]. «"Effect of Various Parameters on Spread in Flashing Operation of Precision Steel Ball manufacturing process", Pratik J. Patel e Saurin Sheth.» 2014.
- [13]. «"Experimental Study on Surface Roughness and Flatness in Lapping of AISI 52100 Steel", M. Farahnakian e H. Shahrajabian.» 2016.
- [14]. «Effect of Various Parameters on Material Removal Rate in Flashing Operation of Precision Steel Ball manufacturing.» 2014.
- [15]. «"Experimental study on lapping ceramic balls with variable-radius groove plate", Fenfen Zhou, Weifeng Yao.» 2021.
- [16]. «"Examination of the material removal mechanisms during the lapping process of advanced ceramic rolling elements", J. Kanga e M. Hadfield.» 2004.
- [17]. «Data-based Probe for Bearing Balls using Design Expert with Biodegradable Media, Saurabh Malpotra.» 2019.
- [18] «R. Reynaud, "7.5.1.P.05 E PROCESSO DI PRODUZIONE CONTROLLO del PROCESSO ISPEZIONE FINALE SFERE-DELIBERA ATTRIBUZIONE MISURA LOTTO, DISPERSIONE DIAMETRO e OVALITÀ" » 2001.
- [19] «SKF, "Manuale tecnico software per la misura e analisi di rotondità e ondulazione"» 2006.
- [20] «E. Buttiglieri, "I-7.1.5-22 A ISTRUZIONE OPERATIVA CONTROLLO MWA 160"» 2018.

- [21] «C.De Pascalis, “I-7.1.5-30 A ISTRUZIONE OPERATIVA MISURA SU SFERE CON MWA 160”.» 2018.
- [22] «S. Rapa, “NNE.FP.100 Sfere d'acciaio cromato per cuscinetti e giunti”.» 2009.
- [23] «KEYENCE, “Manuale d'uso Sensore di flusso ad abbraccio Serie FD-Q”.» 2021.