UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTA' DI SCIENZE STATISTICHE

CORSO DI LAUREA IN STATISTICA E TECNOLOGIE INFORMATICHE

TESI DI LAUREA TRIENNALE

ANALISI DELLA PERFORMANCE DI UN PROCESSO MULTIFASE E MULTIVARIATO

Relatore: Ch.ma Prof.ssa CAPIZZI GIOVANNA

Laureando: BRUNELLO DANIELE
Matricola: 484528

ANNO ACCADEMICO 2004 – 2005

INDICE

0. PREMESSA 5
0.1 L'AZIENDA 5
0.2 IL PROCESSO PRODUTTIVO 5
0.2.1 Compattazione 5
0.2.2 Destearificazione 6
0.2.3 Sinterizzazione 6
0.2.4 Coniatura 7
0.2.5 Sbavatura 7
0.2.6 Trattamenti termici 8
0.2.6.1 Tempra 8
0.2.6.2 Cementazione 8

1. RACCOLTA DEI DATI 11
1.1 Strumenti di misura utilizzati 12
1.2 Tolleranze 13

2. ANALISI ESPLORATIVA DEI DATI 15
2.1 ANALISI DELLA CORRELAZIONE LINEARE TRA LE VARIABILI 15
2.2 ANALISI PER SINGOLE VARIABILI, CONFRONTATE PER FASE 17
2.2.1 La quota sfera 17
2.2.2 L'altezza totale 20
2.2.3 Il salto verticale 22
2.2.4 Il diametro interno misurato all'altezza del mozzo 24
2.2.5 Il diametro interno misurato a metà foro 26
2.2.6 Il diametro interno misurato all'altezza della dentatura 28
2.2.7 Il diametro esterno 30
2.3 OSSERVAZIONI 32

3. CARTE DI CONTROLLO 33
3.1 CENNI SULLE CARTE DI CONTROLLO 33
3.1.1 Le carte di controllo di tipo Shewhart 33
3.1.2 Le carte di controllo di tipo EWMA 34
3.1.3 Le carte di controllo di tipo EWMA per dati autocorrelati 36
3.2 ANALISI DELLE CARTE DI CONTROLLO OTTENUTE 36
3.2.1 La quota sfera 37
3.2.2 L'altezza totale 39
3.2.3 Il salto verticale 41
3.2.4 Il diametro interno misurato all'altezza del mozzo 43
3.2.5 Il diametro interno misurato a metà foro 43
3.2.6 Il diametro interno misurato all'altezza della dentatura 43
3.2.7 Il diametro esterno 44
3.3 OSSERVAZIONI 44

4. ANALISI DELLA CAPABILITY 47
4.1 CENNI SUI CLASSICI INDICI DI CAPACITÀ DEL PROCESSO 47
4.2 GLI INDICI DI CAPACITÀ A VARIANZA PONDERATA PER GENERICI PROCESSI NON-NORMALI 49
4.3 ANALISI DEGLI INDICI DI CAPACITÀ DEL PROCESSO 52
4.3.1 La quota sfera 52
4.3.2 L'altezza totale 53
4.3.3 Il salto verticale 55
4.3.4 Il diametro interno misurato all'altezza del mozzo 56
4.3.5 Il diametro interno misurato a metà foro 57
4.3.6 Il diametro interno misurato all'altezza della dentatura 58
4.3.7 Il diametro esterno 60

5. CONCLUSIONI 63

A. APPENDICE 65
A.1 CARTE DI CONTROLLO 65

BIBLIOGRAFIA 83

0. PREMESSA

La presente relazione descrive parte delle analisi svolte durante lo stage svoltosi presso l'azienda mG miniGears s.p.a. di Padova, nel reparto Controllo della Qualità Sinterizzato (CQS).
Lo scopo è quello di fare un'analisi della performance del processo produttivo multi-fase, per le principale caratteristiche di una corona conica sinterizzata, per avere un'idea sull'andamento della capability non solo della fase finale (che è comunque quella di maggiore interesse), ma anche delle fasi intermedie, dovute alle variazioni dimensionali del pezzo.

0.1 L'AZIENDA

La continua innovazione tecnologica e la costante affidabilità dei prodotti, frutto di una profonda conoscenza della trasmissione del moto, sono il fondamento del successo di miniGears nel mercato dei componenti meccanici di piccole e medie dimensioni.
La padronanza di tecnologie diverse – da quelle tradizionali del taglio di ingranaggi in acciaio, ai processi più innovativi della metallurgia delle polveri e alla continua ricerca e ottimizzazione dell'industrializzazione della produzione in grande serie, conferma miniGears quale azienda leader a livello mondiale nella realizzazione di ingranaggi di elevato valore aggiunto.
Tutte le attività produttive sono certificate ISO 9001:2000 e nell'autunno del 2003 l'azienda ha conseguito anche le certificazioni ISO/TS 16949:2002 e ISO 14001:1996.

0.2 IL PROCESSO PRODUTTIVO

Il processo produttivo dei particolari in metallurgia delle polveri può essere articolato in più fasi, a seconda della forma e delle caratteristiche del pezzo.
Di seguito si riporta una descrizione generale delle singole fasi del processo.

0.2.1 Compattazione

La polvere miscelata ed imballata in contenitori appositi, viene caricata in tramogge, poste al di sopra della pressa e, per gravità, riempie la cavità della

matrice. Il riempimento è effettuato tramite un elemento mobile, chiamato "scarpa", che consente di facilitare ed omogeneizzare il riempimento stesso. Quando la cavità è colma di polvere i punzoni (superiore e inferiore) iniziano il movimento relativo all'interno dello stampo, pressando il particolare. Questo viene poi espulso dai punzoni stessi e allontanato dallo stampo dalla scarpa o tramite appositi dispositivi, mentre nuova polvere entra nella matrice. La differenza tra il volume occupato dalla polvere nella pre-compressione, e quella del particolare pressato è pari a circa 1/3. La pressatura porta ad eliminare l'aria tra le particelle di polvere, deformandole e saldandole reciprocamente, anche se in maniera debole. La possibilità di ottenere un pezzo compatto, che possa essere maneggiato senza sgretolarsi è assicurata da una proprietà della polvere, definita "resistenza al verde", dovuta principalmente alle irregolarità tra le particelle. In fase di pressatura, infatti, queste irregolarità consentono alle particelle di incastrarsi reciprocamente e quindi di dare origine ad un pezzo compatto con una sufficiente resistenza. Per questo motivo il pezzo pressato viene detto "VERDE".

0.2.2 Destearificazione

Prima della sinterizzazione vera e propria i pezzi compatti devono essere sottoposti a un trattamento di estrazione delle sostanze organiche usate nella pressatura (oli, cere, ecc.) con temperature fino a 800°C. Nei forni continui ciò viene fatto nella prima parte del forno.

0.2.3 Sinterizzazione

La sinterizzazione è un processo nel quale, con un meccanismo di diffusione delle lacune e degli atomi nei punti di contatto delle particelle, ovvero ai bordi dei grani, si riducono le porosità, aumentandone la resistenza meccanica.

Questo processo porta a fenomeni di variazioni dimensionali (aumento della densità, diminuzione di volume del pezzo), che vanno tenuti in particolare cura per il controllo delle dimensioni finali del particolare. Queste variazioni, in fase di sinterizzazione, dipendono dai parametri di processo (temperatura, tempo di sinterizzazione) e dalle caratteristiche fisiche e chimiche del compattato (percentuale degli elementi leganti e del carbonio, densità, tipo di polvere).

Il processo dipende dalla temperatura ed avviene in fase solida con eventuale presenza di una piccola percentuale di fase liquida. Talvolta la sinterizzazione è accompagnata da cambiamenti di fase e reazioni chimiche e metallurgiche alle quali possono partecipare anche i gas che compongono l'atmosfera all'interno del forno.

Nei forni industriali moderni si raggiungono temperature massime di sinterizzazione pari a 1450 °C e fino a 1800 °C. La temperatura tipica per la sinterizzazione di acciai al carbonio è circa 1100°C.

L'impiego dei più recenti componenti elettronici e dei controllori a logica programmabile (PLC) permette di controllare con precisione, e di regolare facilmente, secondo il prodotto che si sinterizza, e di programmare tutti i parametri di funzionamento di un forno.

Nella metallurgia delle polveri si usano particolari miscele di gas, di protezione e/o di reazione, la cui composizione, comprese le inevitabili impurità, è molto importante per la qualità del sinterizzato e dipende anche dagli impianti di generazione associati al forno.

0.2.4 Coniatura

Processo di ulteriore pressatura successiva alla sinterizzazione con due scopi: ricavare una buona precisione dimensionale ma soprattutto aumentare localmente la densità. Molto importante negli ingranaggi, dove è possibile aumentare la densità in prossimità dell'addendum della dentatura. Per la presenza di un sovrametallo, richiede elevata forza di compressione. Al termine il pezzo deve essere nuovamente sinterizzato, al fine di rilasciare la tensione residua creatasi durante la fase di coniatura. E' adatto per componenti strutturali molto sollecitati.

0.2.5 Sbavatura

Questa lavorazione meccanica ha lo scopo di eliminare dal particolare le bave che si originano nel processo di pressatura. In particolare prende il nome di spazzolatura (nel caso delle corone coniche) l'operazione in cui, in maniera automatica, si eliminano possibili granelli di impurezze depositatesi sulla dentatura; viene eseguita dopo la sinterizzazione. Nel caso di ingranaggi cilindrici o altri particolari meccanici in cui si vogliono eliminare le bave createsi durante la

fase di compressione, si esegue la fase di burattatura (detta anche di barilatura) dopo il trattamento termico.

0.2.6 Trattamenti termici

Sono applicabili quasi tutti i trattamenti conosciuti, con alcuni accorgimenti specifici dovuti alla presenza di porosità. Questa, associato alla non omogeneità strutturale, al tipo e alla quantità degli elementi in lega danno risultati diversi rispetto agli acciai tradizionali.

0.2.6.1 Tempra

Tale trattamento consiste nel riscaldare il particolare oltre la temperatura di austenitizzazione (superiore agli 830°), in un raffreddamento drastico nel bagno di tempra, seguito da rinvenimento; permette di ottenere ottime caratteristiche meccaniche e di resistenza, buona resistenza ad usura, a scapito delle proprietà plastiche.

0.2.6.2 Cementazione

Tale trattamento, avente il fine di aumentare le caratteristiche meccaniche del particolare, consiste in un riscaldamento a temperature tra 880-900° in atmosfera cementante, ovvero tale da permettere l'arricchimento superficiale di carbonio nel particolare. Tale trattamento viene seguito dalla fase di tempra (solitamente in olio) e da una distensione (tra 150° e 180°). La profondità di cementazione è funzione della densità del sinterizzato e dal grado di interconnessione delle porosità, oltre che del tempo di permanenza nell'atmosfera, dalla percentuale di carbonio in atmosfera e dalla temperatura. Il trattamento di cementazione per gli acciai sinterizzati presenta delle differenze rispetto a quello utilizzato per gli acciai tradizionali, dovuto alla presenza delle porosità.

In *figura 0.1* è schematizzato un generico ciclo di produzione in metallurgia delle polveri.

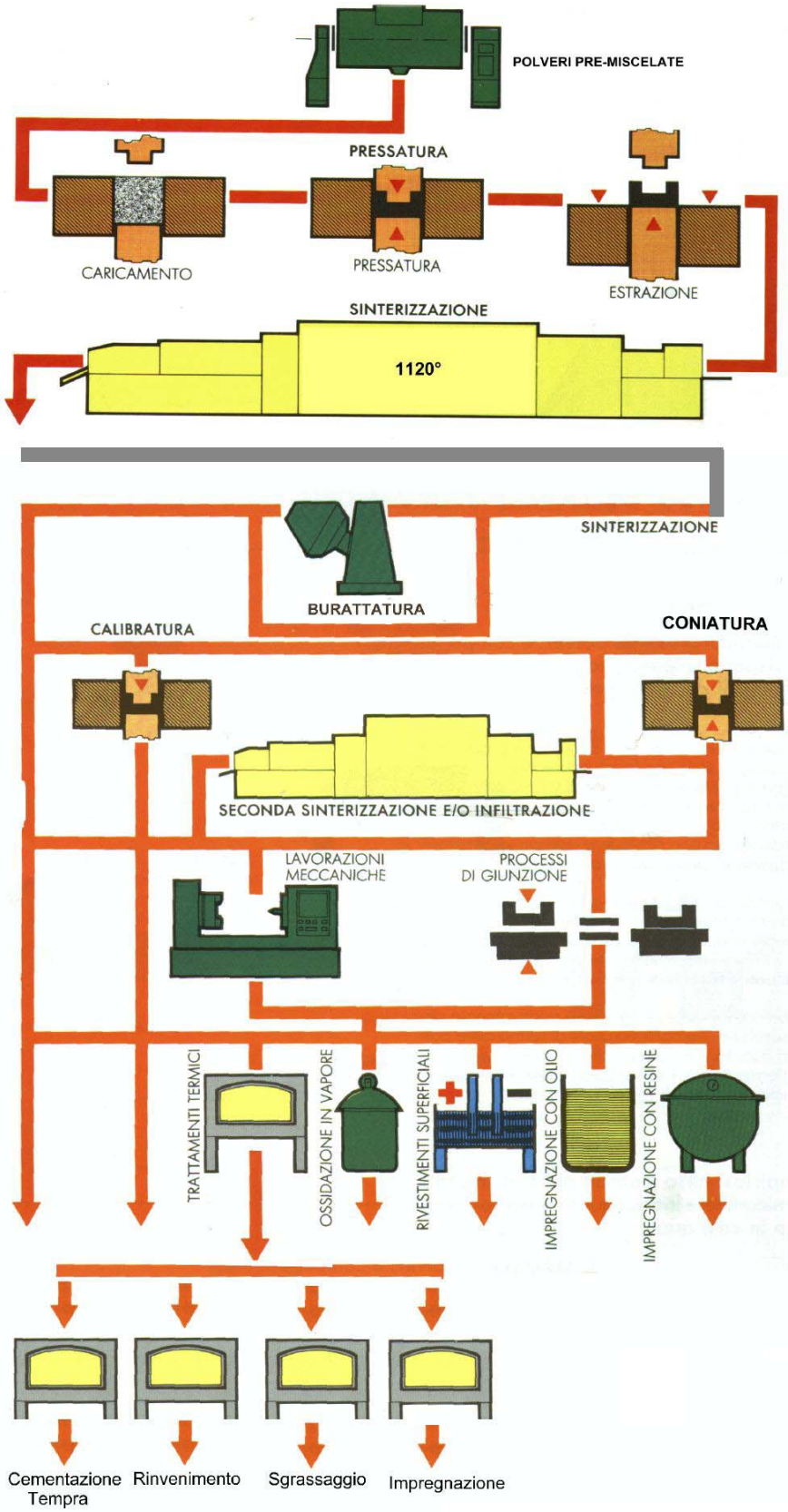


Figura 0.1: Generico ciclo produttivo in metallurgia delle polveri.

1. RACCOLTA DEI DATI

Il pezzo che è stato monitorato nelle varie fasi del processo produttivo, è una corona conica sinterizzata, della quale sono state rilevate, per ogni fase, le misure relative a sette caratteristiche principali: la quota sfera, l'altezza totale, il salto verticale, il diametro interno misurato in 3 punti (all'altezza del mozzo, a metà foro e all'altezza della dentatura) ed infine il diametro esterno.
Le fasi del processo monitorate e ritenute critiche, in quanto portano a delle variazioni dimensionali del pezzo, sono essenzialmente cinque, queste sono le fasi di:

- compattazione;
- prima sinterizzazione;
- coniatura;
- seconda sinterizzazione;
- trattamento termico.

Per ogni fase è stato estratto dall'intero lotto prodotto un campione casuale di 50 pezzi, in modo da avere un campione che comprenda tutte le possibili fonti di variabilità avute durante la produzione.
Si noti che, per ogni fase il campione estratto non corrisponde a quello estratto nella fase precedente, ma ogni volta sono pezzi diversi. Si sottolinea poi, che i pezzi non hanno un ordine sequenziale, in quanto sono stati presi a produzione finita, e non durante la produzione.
La fase più "problematica" è quella di compattazione, in quanto in questa fase vengono conferite le misure iniziali al pezzo; dunque in questa fase è stato utilizzato un monitoraggio diverso: sono stati estratti 2 pezzi ogni ora, presi e misurati direttamente dagli operatori per tutta la durata del processo.
Per problemi di addestramento degli operatori e di affidabilità delle misurazioni fatte, nella fase di compattazione, gli operatori registravano solo le misure assiali, e non le radiali (più complesse).

Per andare a coprire la mancanza di informazioni per le altre misure (radiali), a fine produzione, è stato estratto un ulteriore campione di altri 30 pezzi, sui quali sono state rilevate le misure mancanti per questa fase.

Si hanno così i seguenti campioni:

Fase	Campioni raccolti
Durante compattazione	199 campioni di 2 pezzi
Dopo compattazione	1 campione di 30 pezzi
Dopo 1^ sinterizzazione	1 campione di 50 pezzi
Dopo coniatura	1 campione di 50 pezzi
Dopo 2^ sinterizzazione	1 campione di 50 pezzi
Dopo tratt. termico	1 campione di 50 pezzi

Tabella 1.1: Sintesi del campionamento utilizzato.

1.1 STRUMENTI DI MISURA UTILIZZATI

Al fine di non introdurre ulteriore variabilità nelle misurazioni eseguite, le rilevazioni sono state fatte, in ogni fase, sempre con gli stessi strumenti di misura.
La scelta degli strumenti utilizzati si è basata su due criteri:

- lo strumento ovviamente doveva essere in grado di misurare correttamente la caratteristica misurata;
- la sensibilità dello strumento doveva essere compatibile con le tolleranze della caratteristica interessata.

Nello specifico, gli strumenti di misura utilizzati sono:

- un comparatore centesimale, ovvero con sensibilità pari ad un centesimo di millimetro, per misurare la quota sfera, l'altezza totale ed il salto verticale;
- un micrometro millesimale per interni, con sensibilità pari ad un millesimo di millimetro, per misurare alle diverse altezze il diametro interno;
- un calibro centesimale, per misurare il diametro esterno.

1.2 TOLLERANZE

Le tolleranze delle varie caratteristiche in alcune fasi possono variare; in particolare, le tolleranze relative alla prima fase differiscono da quelle delle fasi successive.

Ecco di seguito la descrizione dettagliata delle tolleranze per ogni caratteristica.

	Fase				
Caratteristica	**Compatt.**	**1^ Sinter.**	**Coniatura**	**2^ Sinter.**	**Tratt. Termico**
Quota sfera	19.79 / 19.93	Vedi T.T.	Vedi T.T.	Vedi T.T.	19.55 / 19.75
Altezza totale	23.14 / 23.34	Vedi T.T.	Vedi T.T.	Vedi T.T.	22.8 / 23.2
Salto	8.55 / 8.65	Vedi T.T.	Vedi T.T.	Vedi T.T.	8.45 / 8.55
Diam. interno	Vedi T.T.	Vedi T.T.	Vedi T.T.	Vedi T.T.	13.94 / 13.97
Diam. esterno	Vedi T.T.	Vedi T.T.	Vedi T.T.	Vedi T.T.	81.30 / 81.70

Tabella 1.2: Tolleranze delle varie caratteristiche, divise per fase

2. ANALISI ESPLORATIVA DEI DATI

Successivamente alla raccolta dei dati, che, data la complessità, è durata diversi giorni, è stata svolta una prima analisi esplorativa dei dati, per capire come i dati si distribuiscono, se sono tra loro autocorrelati e se potevano esservi delle relazioni tra le variabili.

2.1 ANALISI DELLA CORRELAZIONE LINEARE TRA LE VARIABILI

Per prima cosa, si è cercato di esplorare l'esistenza di una qualche relazione lineare, attraverso dei grafici di dispersione, ottenuti dividendo le osservazioni per fase.

Dai grafici ottenuti, (*figura 2.1*), si nota che:

- nella prima fase vi è una buona correlazione positiva tra le variabili `h.tot` e `salto`, tra le variabili `mezzo.foro` e `foro.denti`, e tra `mezzo.foro` e `diam.est`;
- nella seconda fase non sembrano esserci delle evidenti relazioni lineari tra le variabili;
- dalla seconda alla quinta fase, vi è una marcata relazione lineare positiva tra le tre variabili `foro.mozzo`, `mezzo.foro` e `foro.denti`, questo dovuto probabilmente alla natura stessa delle misurazioni: sono tutte e tre infatti le misure dello stesso diametro interno, quest'ultimo misurato però a diverse altezze allo scopo di verificare la forma interna del foro.

Calcolando poi le matrici di correlazione, si hanno le stesse informazioni ottenute in precedenza.

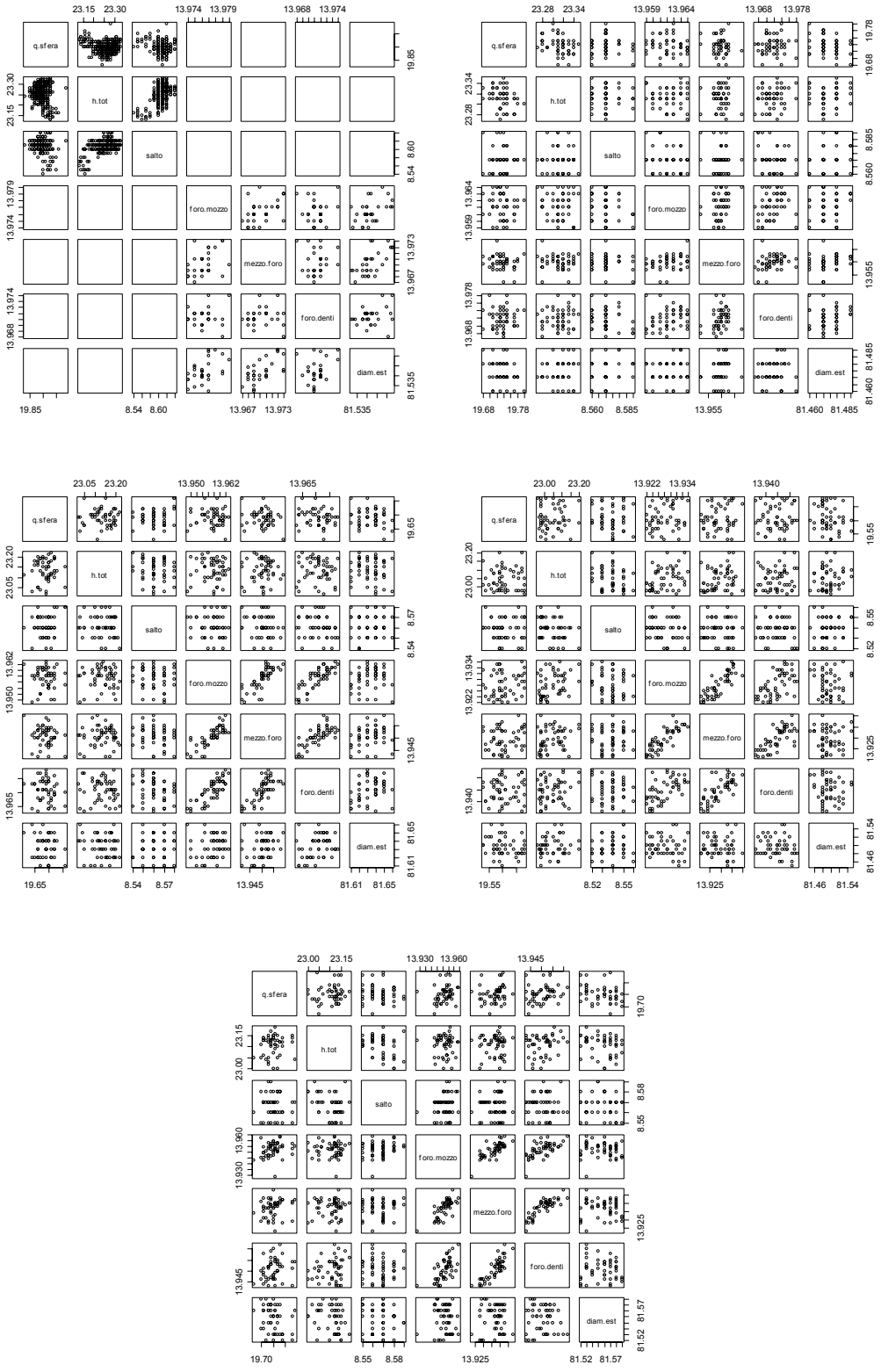


Figura 2.1: Matrici di grafici di dispersione delle osservazioni divise per fasi.

2.2 ANALISI DELLE SINGOLE VARIABILI, CONFRONTATE PER FASE

Di seguito procederemo con l'analisi delle singole variabili, confrontandole fase per fase, per vedere nei dettagli le variazioni dimensionali che si hanno durante il processo.

In particolare, per ogni variabile, verranno confrontati i boxplot relativi ad ogni fase per capire come le variabili cambiano, al variare della fase, in termini di media e varianza. Con l'ausilio di istogrammi poi, si tenterà di vedere se tra le fasi del processo produttivo, la distribuzione delle variabili cambia, ed eventualmente anche in che modo.

Di seguito, per verificare se i dati si distribuiscono normalmente, oltre agli istogrammi, verranno utilizzati anche dei test di Shapiro-Wilk e dei Q-Q plot.

L'analisi, per ogni variabile, si concluderà con la costruzione dei correlogrammi di ogni fase, per vedere se le osservazioni sono tra loro correlate; infine si tenterà di modellare le variabili di interesse in funzione della fase di lavorazione, e con il test non parametrico di Kruskal-Wallis si cercherà di vedere se è significativa la diversità in media tra le fasi.

2.2.1 La quota sfera

I boxplot, *figura 2.2*, mostrano che la variabile subisce delle variazioni durante le varie fasi; vi è prima un abbassamento della media, per poi esserci nell'ultima fase nuovamente un innalzamento. Si può notare anche, un graduale, anche se lieve, aumento della variabilità.

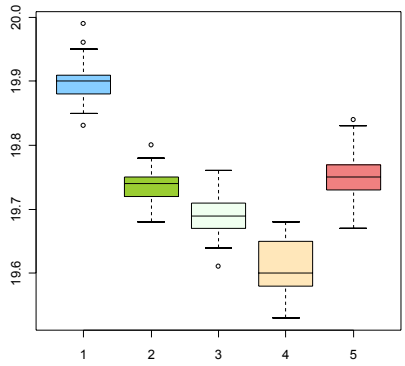


Figura 2.2: Boxplot della quota sfera, divisa per fase

Gli istogrammi, *figura 2.3*, invece, evidenziano che durante le varie fasi la distribuzione della variabile cambia, per tornare nell'ultima fase alla forma assunta dalla distribuzione in fase di compattazione (prima fase).
Per quanto riguarda la normalità dei dati, il test di Shapiro-Wilk porta ad accettare l'ipotesi di normalità dei dati per tutte le fasi eccetto che per la quarta e la prima fase.

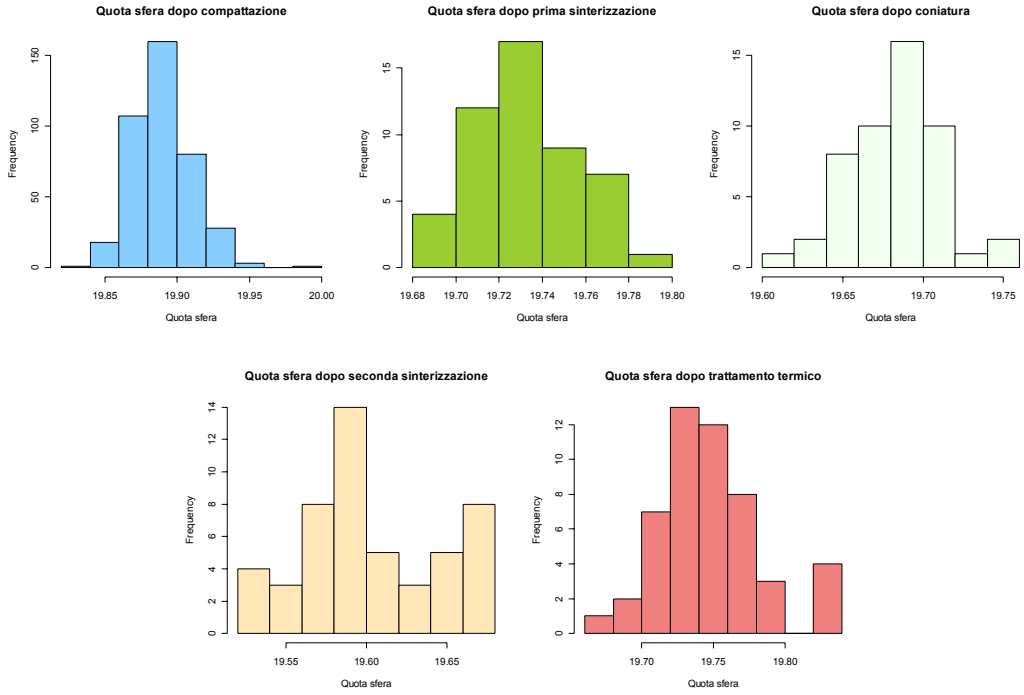


Figura 2.3: Istogrammi della variabile quota sfera, fase per fase.

Guardando i correlogrammi di *figura 2.4*, si nota che i dati provenienti dalla prima fase sono tra loro autocorrelati, mentre i campioni estratti nelle fasi successive risultano non avere al loro interno autocorrelazione. Questo fatto era prevedibile, in quanto i campioni raccolti nella prima fase sono stati raccolti in ordine progressivo a intervalli regolari di un'ora, mentre i campioni raccolti nelle fasi successive alla prima sono stati estratti a caso dall'intero lotto prodotto, dopo la produzione.

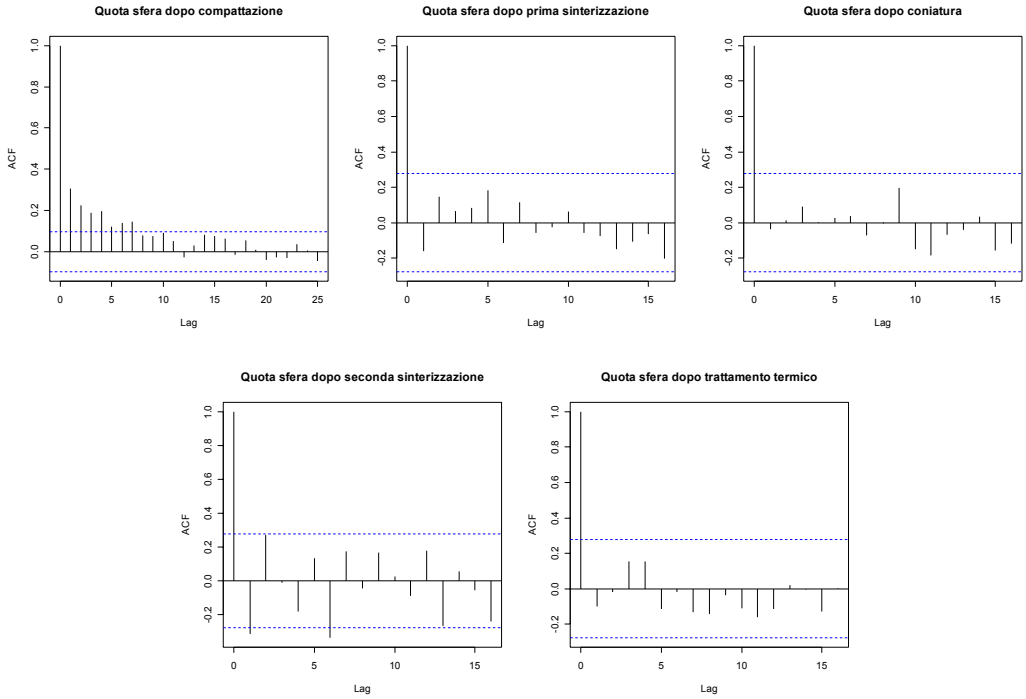


Figura 2.4: Correlogrammi della variabile quota sfera

In ultimo si procede modellando la variabile quota sfera in funzione della fase di lavorazione:

```
Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.08140 -0.01558  0.00100  0.01442  0.09442

Coefficients:
             Estimate Std. Error  t value Pr(>|t|)
(Intercept) 19.895578   0.001289 15433.78   <2e-16 ***
fase2       -0.159778   0.003859   -41.41   <2e-16 ***
fase3       -0.206578   0.003859   -53.54   <2e-16 ***
fase4       -0.287978   0.003859   -74.63   <2e-16 ***
fase5       -0.144178   0.003859   -37.37   <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1

Residual standard error: 0.02572 on 593 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.938,      Adjusted R-squared: 0.9376
F-statistic:  2242 on 4 and 593 DF,  p-value: < 2.2e-16

        Kruskal-Wallis rank sum test

Kruskal-Wallis chi-squared = 418.0852, df = 4, p-value < 2.2e-16
```

Come si può notare, la media della quota sfera è significativamente diversa da fase a fase, come mostra il livello di significatività osservato per la statistica F che

porta a rifiutare l'ipotesi di uguaglianza dei valori medi della variabile quota sfera in rapporto alla fase di lavorazione; stesso risultato lo si ottiene anche utilizzando il test non parametrico di Kruskal-Wallis.

2.2.2 Altezza totale

Dall'analisi svolta si nota che l'altezza totale ha caratteristiche molto comuni alla variabile quota sfera, infatti:

- anche questi boxplot, *figura 2.5*, mostrano delle variazioni durante le fasi;
- andando a vedere gli istogrammi, *figura 2.6*, si evince ancora una somiglianza della distribuzione della variabile nella prima e nella quinta fase;
- andando, poi, a vedere i correlogrammi, *figura 2.7*, come per la variabile precedente solo nella prima fase i dati sono tra loro autocorrelati.

Per quel che riguarda la normalità dei dati, si nota che in questo caso i nostri dati non sono sicuramente approssimabili ad una distribuzione normale. A conferma di questa affermazione, lo sono anche i valori della statistica di Shapiro-Wilk, che portano al rifiuto dell'ipotesi di normalità delle osservazioni.

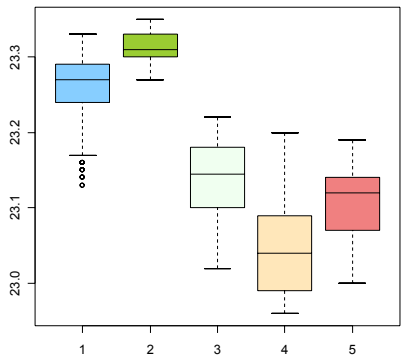


Figura 2.5: Boxplot della variabile altezza totale, in funzione della fase

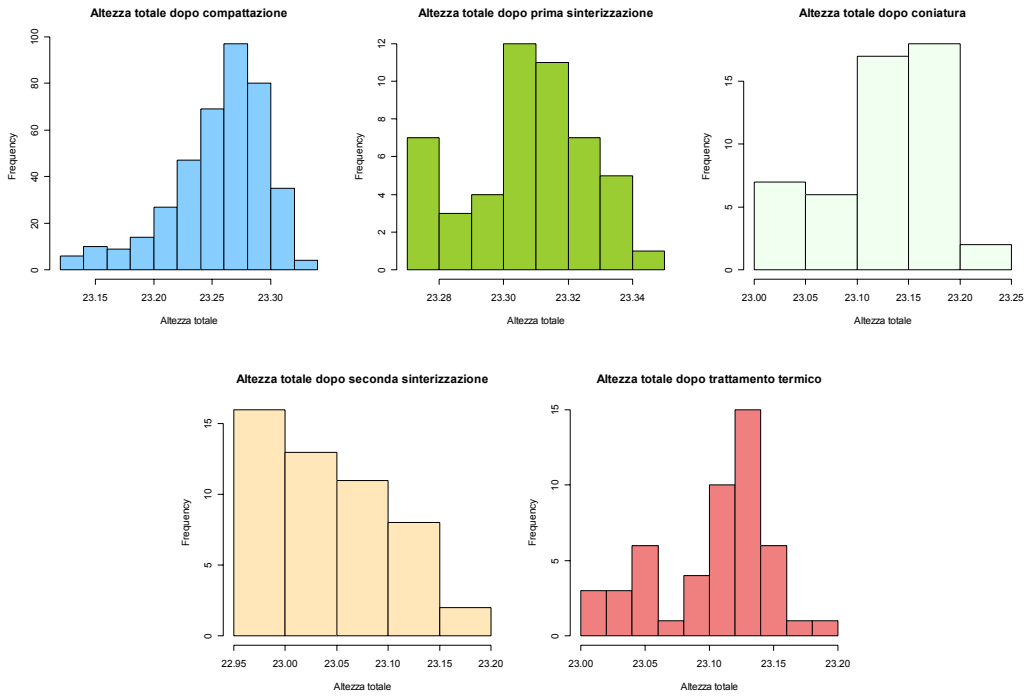


Figura 2.6: Istogrammi della variabile altezza totale, divisa per fase.

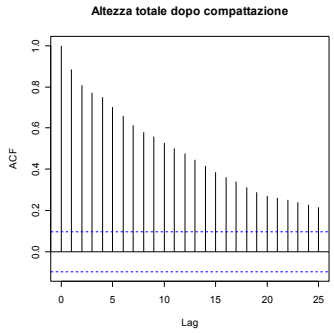


Figura 2.7: Correlogrammi della variabile altezza totale.

Infine, cerchiamo di modellare l'altezza totale in funzione della fase del processo:

```
Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.13088 -0.02240  0.00912  0.02912  0.15360

Coefficients:
             Estimate Std. Error   t value Pr(>|t|)
(Intercept) 23.260879   0.002158 10776.918  < 2e-16 ***
fase2        0.051521   0.006461     7.974 7.92e-15 ***
fase3       -0.125879   0.006461   -19.484  < 2e-16 ***
fase4       -0.214479   0.006461   -33.197  < 2e-16 ***
fase5       -0.153679   0.006461   -23.786  < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1
```

```
Residual standard error: 0.04306 on 593 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.7654,     Adjusted R-squared: 0.7638
F-statistic: 483.7 on 4 and 593 DF,  p-value: < 2.2e-16

        Kruskal-Wallis rank sum test

Kruskal-Wallis chi-squared = 373.9986, df = 4, p-value < 2.2e-16
```

Si nota che, anche in questo caso, i livelli di significatività osservati dei coefficienti stimati sono altamente significativi, questo sta ad indicare che la media di ogni fase è significativamente diversa rispetto alla media della prima fase (che nel modello è presa come fase di riferimento).
I valori della statistica F e del test di Kruskal-Wallis, portano infatti a rifiutare l'ipotesi di uguaglianza in media dell'altezza totale rispetto alla fase di lavorazione.

2.2.3 Salto verticale

Come nelle variabili precedenti, anche qui vi è un graduale abbassamento della media, seguito nell'ultima fase da un innalzamento della stessa; mentre per quel che concerne la variabilità, rispetto alla prima fase, vi è una diminuzione della varianza.

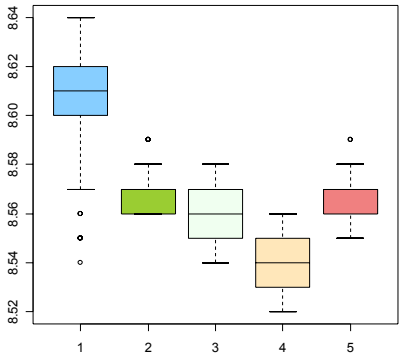


Figura 2.8: Boxplot della variabile salto verticale in funzione della fase

Dagli istogrammi, *figura 2.9*, si nota che le distribuzioni delle ultime 3 fasi sono abbastanza simili nella forma, mentre sono nettamente diverse rispetto alle 2 fasi precedenti.

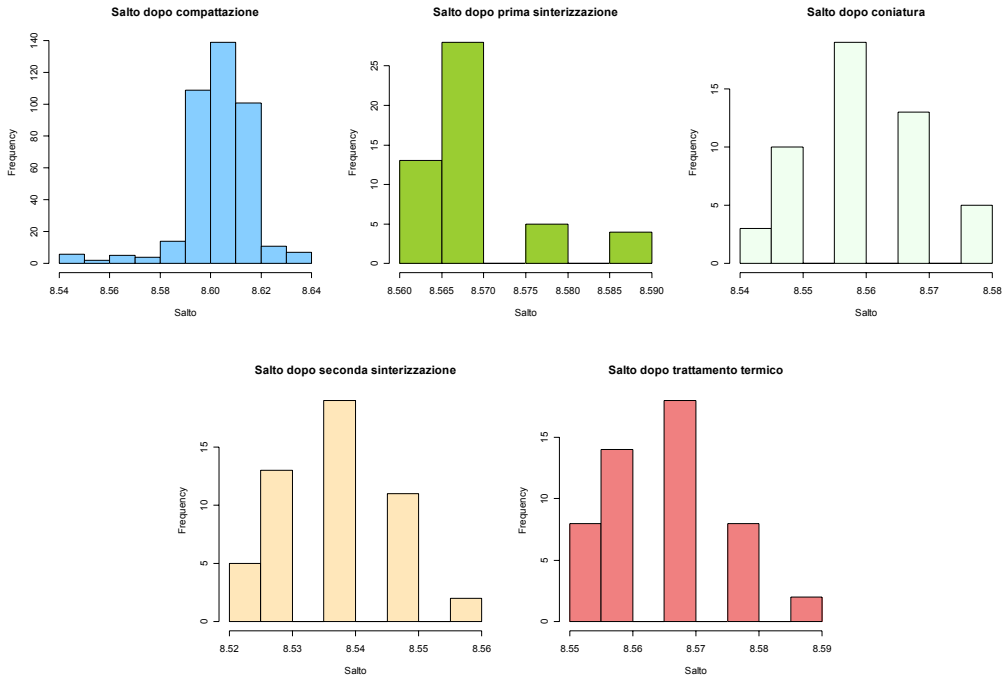


Figura 2.9: Istogrammi relativi al salto verticale

Utilizzando dei test di normalità di Shapiro-Wilk o utilizzando dei Q-Q Plot applicati ai dati in esame, si rifiuta anche in questo caso, per ogni fase, l'ipotesi di normalità dei dati.

Per quel che riguarda poi l'autocorrelazione dei dati, (*figura 2.10)*, si notano le stesse cose sottolineate a proposito delle due precedenti variabili esaminate.

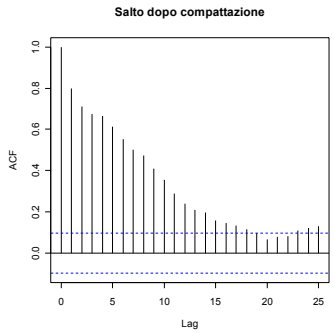


Figura 2.10: Correlogramma della variabile salto verticale nella prima fase.

Per quel che concerne l'analisi della varianza, anche qui si nota che la media del salto verticale è significativamente diversa fase per fase, come dimostrano il test sulla statistica F del modello lineare ed il test di Kruskal-Wallis.

Infine, osservando i coefficienti stimati nel modello lineare, si nota che sono tutti significativi, questo sta ad indicare che la media delle varie fasi è significativamente diversa dalla media della prima fase, (che nel modello è presa come riferimento).

```
Residuals:
      Min        1Q    Median        3Q       Max
-0.068191 -0.008191  0.001809  0.011600  0.031809

Coefficients:
             Estimate Std. Error  t value Pr(>|t|)
(Intercept)  8.6081910  0.0006342 13573.57   <2e-16 ***
fase2       -0.0381910  0.0018983   -20.12   <2e-16 ***
fase3       -0.0467910  0.0018983   -24.65   <2e-16 ***
fase4       -0.0697910  0.0018983   -36.76   <2e-16 ***
fase5       -0.0417910  0.0018983   -22.02   <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1

Residual standard error: 0.01265 on 593 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.7875,     Adjusted R-squared: 0.786
F-statistic: 549.3 on 4 and 593 DF,  p-value: < 2.2e-16

        Kruskal-Wallis rank sum test

Kruskal-Wallis chi-squared = 393.883, df = 4, p-value < 2.2e-16
```

2.2.4 Diametro interno misurato all'altezza del mozzo

Per prima cosa vediamo dai boxplot, *figura 2.11*, che il diametro interno misurato all'altezza del mozzo cambia nettamente fase per fase, sia dal punto di vista della media che della variabilità. Come nelle variabili viste in precedenza si nota che nelle prime quattro fasi la media tende ad abbassarsi, per poi risalire nell'ultima fase; mentre per quel che riguarda la dispersione si nota un graduale aumento della variabilità.

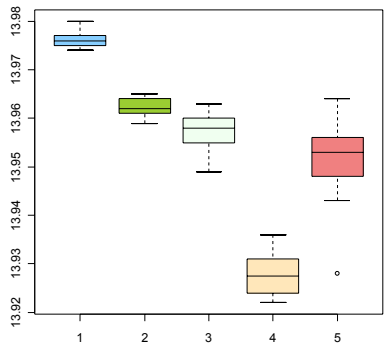


Figura 2.11: Boxplot relativi al diametro interno misurato all'altezza del mozzo

Gli istogrammi, *figura 2.12*, evidenziano invece che a seconda della fase varia in modo molto vistoso anche la natura della distribuzione dei dati, mentre i valori della statistica di Shapiro-Wilk applicata alle osservazioni, porta al rifiuto dell'ipotesi di normalità dei dati per ogni fase.

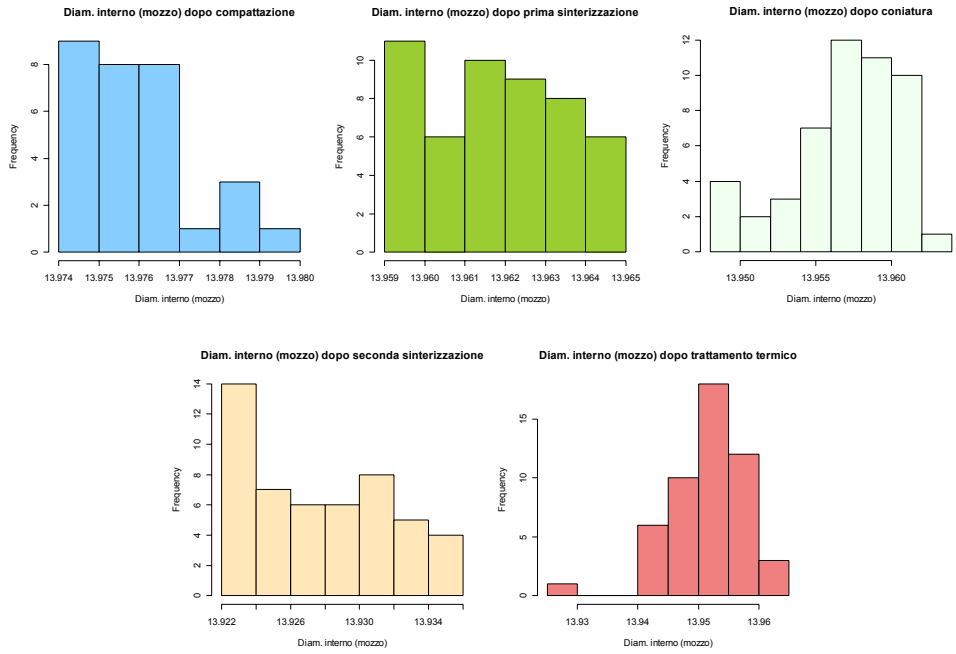


Figura 2.12: Istogrammi del diametro interno misurato all'altezza del mozzo

Per quel che concerne invece l'autocorrelazione dei dati in questo caso, diversamente dalle variabili precedenti, i correlogrammi, (qui non riportati), non evidenziano alcun tipo di autocorrelazione. Questo è dovuto evidentemente dal fatto che, essendo questa una misura radiale, le misure non sono state fatte dagli operatori, e quindi per questa variabile non è stato usato un campionamento di 2 pezzi ogni ora nella fase di compattazione, bensì anche per questa fase è stato estratto un campione casuale a fine produzione; questo ha portato a non avere alcuna forma di autocorrelazione con questa variabile.

L'analisi della varianza, dei coefficienti stimati nel modello lineare e il test di Kruskal-Wallis, come nei casi precedenti, mette in evidenza la relazione

significativa esistente tra la variazione della fase e la variazione della media della variabile diametro interno misurato all'altezza del mozzo.

```
Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.02404 -0.00222  0.00054  0.00254  0.01196

Coefficients:
             Estimate Std. Error  t value Pr(>|t|)
(Intercept) 13.9763333  0.0007293 19163.43   <2e-16 ***
fase2       -0.0141133  0.0009225   -15.30   <2e-16 ***
fase3       -0.0188733  0.0009225   -20.46   <2e-16 ***
fase4       -0.0482733  0.0009225   -52.33   <2e-16 ***
fase5       -0.0242933  0.0009225   -26.33   <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1

Residual standard error: 0.003995 on 225 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.9362,     Adjusted R-squared: 0.9351
F-statistic: 825.5 on 4 and 225 DF,  p-value: < 2.2e-16

        Kruskal-Wallis rank sum test

Kruskal-Wallis chi-squared = 199.6514, df = 4, p-value < 2.2e-16
```

2.2.5 Diametro interno misurato a metà foro

Osservando i boxplot, *figura 2.13*, e gli istogrammi, *figura 2.14*, si notano gli stessi fenomeni sottolineati per il diametro interno misurato all'altezza del mozzo; questo dovuto probabilmente al fatto che le due misure sono molto simili.

Per quanto riguarda la normalità dei dati, invece, il test di Shapiro-Wilk applicato alle osservazioni porta ad accettare l'ipotesi di normalità dei dati solo nella seconda fase; mentre per quel che concerne l'autocorrelazione, anche in questo caso i correlogrammi non evidenziano nessun tipo di autocorrelazione tra i dati.

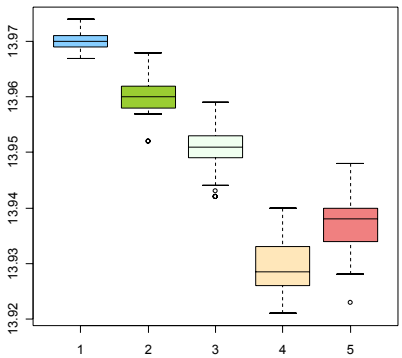


Figura 2.13: Boxplot relativi al diametro interno misurato a metà foro.

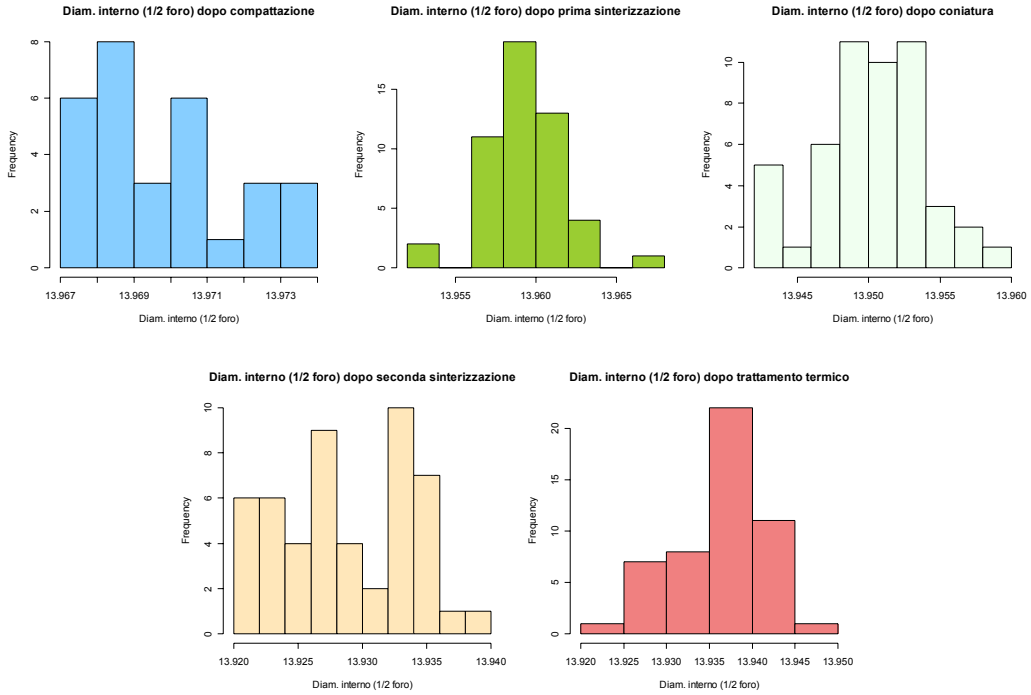


Figura 2.14: Istogrammi del diametro interno misurato a metà foro.

L'analisi della varianza, in ultimo, porta ad evidenziare che la diversità della media nelle varie fasi di produzione è significativa, come trovato nelle variabili precedenti.

```
Residuals:
      Min        1Q    Median        3Q       Max
-0.014000 -0.002267  0.000200  0.002733  0.011000

Coefficients:
             Estimate Std. Error  t value Pr(>|t|)
(Intercept) 13.9702667  0.0007460 18727.44   <2e-16 ***
fase2       -0.0104667  0.0009436   -11.09   <2e-16 ***
fase3       -0.0196267  0.0009436   -20.80   <2e-16 ***
fase4       -0.0409467  0.0009436   -43.39   <2e-16 ***
fase5       -0.0332667  0.0009436   -35.26   <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1
Residual standard error: 0.004086 on 225 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.924,      Adjusted R-squared: 0.9226
F-statistic: 683.5 on 4 and 225 DF,  p-value: < 2.2e-16

        Kruskal-Wallis rank sum test

Kruskal-Wallis chi-squared = 210.083, df = 4, p-value < 2.2e-16
```

2.2.6 Diametro interno misurato all'altezza della dentatura

Dai boxplot, *figura 2.15*, si nota che la variabile gradualmente aumenta la variabilità, mentre per quel che riguarda la media, nelle prime 3 fasi è pressoché uguale, mentre cambia significativamente dalla quarta fase.

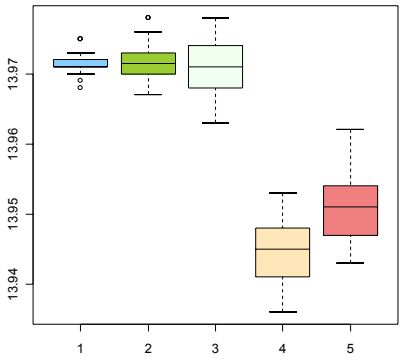


Figura 2.15: Boxplot relativi al diametro interno misurato all'altezza della dentatura

Gli istogrammi, *figura 2.16*, invece evidenziano che in ogni fase, la distribuzione della variabile in esame cambia completamente anche di forma; mentre il test di

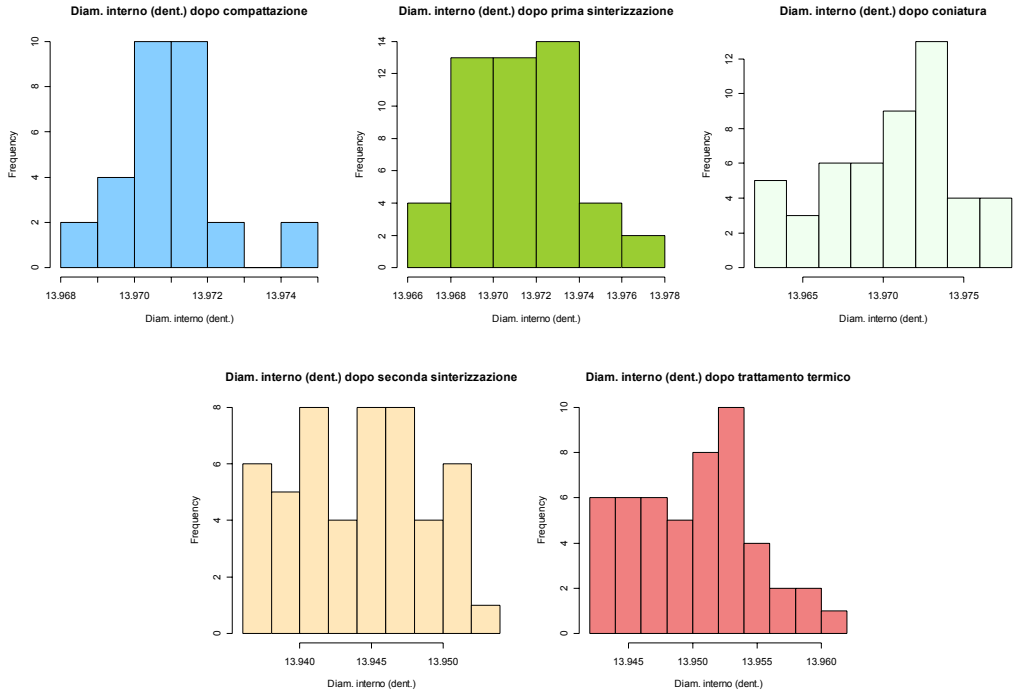


Figura 2.16: Istogrammi del diametro interno misurato all'altezza della dentatura

Shapiro-Wilk porta ad accettare l'ipotesi di normalità dei dati in tutte le fasi ad eccezione dei dati in compattazione (prima fase).

I correlogrammi non evidenziano alcun tipo di autocorrelazione tra le osservazioni, come ci si aspettava anche per questa variabile; l'analisi della significatività dei coefficienti stimati nel modello di regressione lineare, invece, evidenzia quello che avevamo già notato dai boxplot, ovvero che nelle fasi due e tre la media del diametro interno misurato all'altezza della dentatura non cambia in modo significativo rispetto alla prima, mentre cambia in modo significativo nelle ultime due fasi del processo.

```
Residuals:
      Min        1Q    Median        3Q       Max
-0.008620 -0.002695  0.000180  0.002280  0.011280

Coefficients:
             Estimate Std. Error   t value Pr(>|t|)
(Intercept) 13.9714333  0.0007021 19898.739   <2e-16 ***
fase2        0.0003267  0.0008881     0.368    0.713
fase3       -0.0005533  0.0008881    -0.623    0.534
fase4       -0.0268133  0.0008881   -30.191   <2e-16 ***
fase5       -0.0207133  0.0008881   -23.322   <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1

Residual standard error: 0.003846 on 225 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.9075,     Adjusted R-squared: 0.9058
F-statistic: 551.6 on 4 and 225 DF,  p-value: < 2.2e-16

        Kruskal-Wallis rank sum test

Kruskal-Wallis chi-squared = 175.0015, df = 4, p-value < 2.2e-16
```

Come abbiamo già visto in precedenza, il diametro interno è stato misurato a tre altezza differenti per vedere qual è la forma del foro; dall'analisi di queste ultime variabili, sembrerebbe esserci un effetto sulla misura dovuto alla posizione della misurazione: il boxplot di *figura 2.15* è diverso da quello di *figura 2.11* e *2.13*, che d'altra parte si somigliano.
Proviamo, dunque, a modellare il diametro interno in funzione di due fattori: la fase di lavorazione e la posizione di misurazione.

```
Residuals:
      Min        1Q    Median        3Q       Max
-0.024040 -0.002267  0.000200  0.002540  0.011960
```

```
Coefficients:
                Estimate Std. Error   t value Pr(>|t|)
(Intercept)   13.9763333  0.0007260 19250.236  < 2e-16 ***
fasi2         -0.0141133  0.0009184   -15.368  < 2e-16 ***
fasi3         -0.0188733  0.0009184   -20.551  < 2e-16 ***
fasi4         -0.0482733  0.0009184   -52.564  < 2e-16 ***
fasi5         -0.0242933  0.0009184   -26.453  < 2e-16 ***
pos2-MF       -0.0060667  0.0010268    -5.909 5.48e-09 ***
pos3-FD       -0.0049000  0.0010268    -4.772 2.23e-06 ***
fasi2:pos2-MF  0.0036467  0.0012988     2.808  0.00513 **
fasi3:pos2-MF -0.0007533  0.0012988    -0.580  0.56208
fasi4:pos2-MF  0.0073267  0.0012988     5.641 2.48e-08 ***
fasi5:pos2-MF -0.0089733  0.0012988    -6.909 1.13e-11 ***
fasi2:pos3-FD  0.0144400  0.0012988    11.118  < 2e-16 ***
fasi3:pos3-FD  0.0183200  0.0012988    14.106  < 2e-16 ***
fasi4:pos3-FD  0.0214600  0.0012988    16.523  < 2e-16 ***
fasi5:pos3-FD  0.0035800  0.0012988     2.756  0.00600 **
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1

Residual standard error: 0.003977 on 675 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.9344,     Adjusted R-squared: 0.933
F-statistic: 686.3 on 14 and 675 DF,  p-value: < 2.2e-16


Analysis of Variance Table

Response: foro.interno
           Df   Sum Sq  Mean Sq F value    Pr(>F)
fasi        4 0.121279 0.030320 1917.30 < 2.2e-16 ***
pos         2 0.020971 0.010486  663.07 < 2.2e-16 ***
fasi:pos    8 0.009688 0.001211   76.58 < 2.2e-16 ***
Residuals 675 0.010674 0.000016
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1
```

Come si può notare, tutti i coefficienti stimati nel modello risultano essere significativi, ad eccezione per l'interazione tra la terza fase e la posizione di misura posta a metà foro; questo sta ad indicare che nella misura del diametro interno influisce sia la fase di lavorazione, sia il punto in cui avviene la misurazione.

2.2.7 Diametro esterno

Osservando i boxplot, *figura 2.17*, si osserva un progressivo aumento della variabilità, mentre per quel che riguarda la media della variabile vi è un andamento irregolare: per un primo tratto la media scende, per poi risalire nella terza fase, quindi scende nuovamente nella quarta ed infine vi è una nuova risalita nella quinta ed ultima fase.

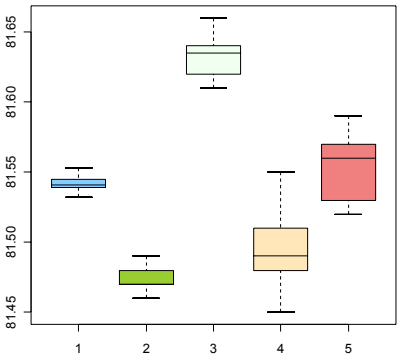


Figura 2.17: Boxplot relativi al diametro esterno.

Analizzando invece gli istogrammi, *figura 2.18*, si vede una progressiva trasformazione della forma della distribuzione della variabile in esame. Per quel che concerne la normalità, il test di Shapiro-Wilk porta ad accettare l'ipotesi di normalità dei dati solo per il campione relativo alla prima fase.

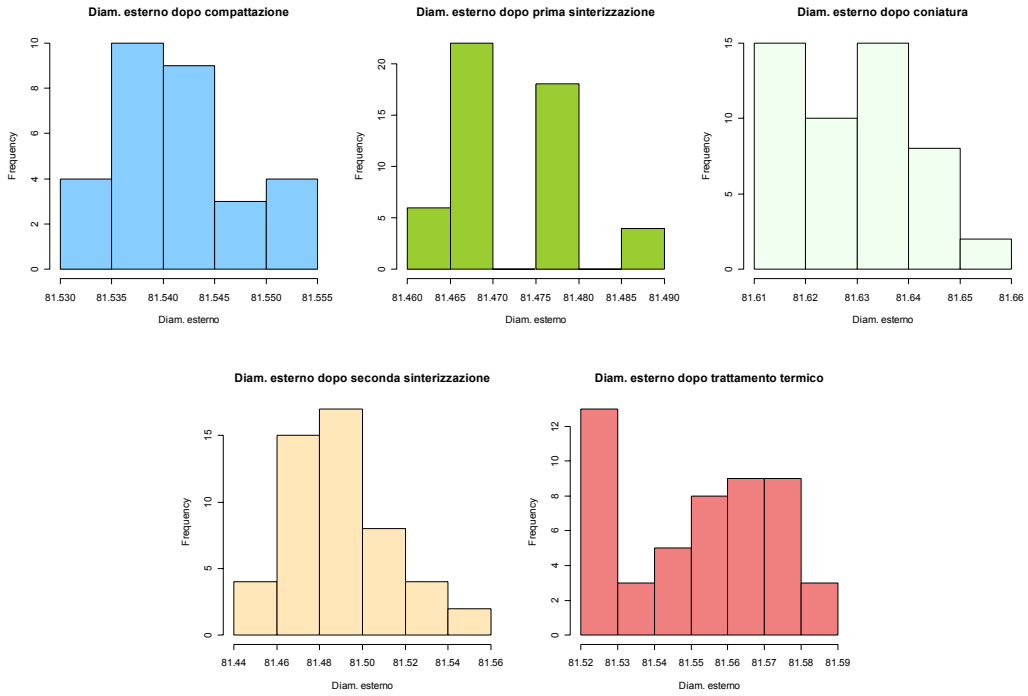


Figura 2.18: Istogrammi relativi al diametro esterno.

I correlogrammi, anche in questo caso, non evidenziano alcun tipo di autocorrelazione tra le osservazioni, per ogni fase del processo; mentre l'analisi della varianza, come nelle variabili precedentemente analizzate, porta a sottolineare che la media del diametro esterno delle varie fasi, differisce significativamente rispetto alla prima.

```
Residuals:
      Min        1Q    Median        3Q       Max
-0.045400 -0.008817 -0.002067  0.006600  0.054600

Coefficients:
             Estimate Std. Error   t value Pr(>|t|)
(Intercept) 81.542067   0.002983 27338.227  < 2e-16 ***
fase2       -0.068067   0.003773   -18.041  < 2e-16 ***
fase3        0.091333   0.003773    24.208  < 2e-16 ***
fase4       -0.046667   0.003773   -12.369  < 2e-16 ***
fase5        0.014333   0.003773     3.799 0.000187 ***
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1
Residual standard error: 0.01634 on 225 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.9274,     Adjusted R-squared: 0.9261
F-statistic: 718.5 on 4 and 225 DF,  p-value: < 2.2e-16

        Kruskal-Wallis rank sum test

Kruskal-Wallis chi-squared = 202.1371, df = 4, p-value < 2.2e-16
```

2.3 OSSERVAZIONI

Dall'analisi esplorativa dei dati sono emerse alcune questioni importanti che non sono da trascurare:

- la maggior parte dei dati non si distribuisce in modo normale;
- nelle misure assiali (quota sfera, altezza totale e salto verticale) relative alla prima fase, ovvero alla fase di compattazione, le osservazioni sono tra loro autocorrelate.

La violazione dell'ipotesi di normalità e dell'ipotesi di indipendenza influenza fortemente l'interpretazione delle carte Shewhart; tuttavia le carte EWMA sono sufficientemente robuste rispetto a lievi violazioni della normalità e consente di trattare in modo efficiente alcuni modelli di correlazione.

Si noti che, per risolvere il problema della non-normalità dei dati, sono stati tentati diversi tipi di trasformazioni, (tra cui anche la trasformazioni di Box-Cox), ma con nessun miglioramento significativo, per cui si è preferito continuare ad utilizzare i dati originari.

3. CARTE DI CONTROLLO

Il nostro fine ultimo è quello di fare un'analisi della capacità dell'intero processo produttivo, ma prima di far questo dobbiamo verificare che il processo sia in controllo e che sia stabile.

Per verificare se il processo è in controllo useremo due tipi diversi di carte di controllo: delle carte di controllo di tipo EWMA per dati autocorrelati, per controllare le variabili quota sfera, altezza totale e salto, nelle prima fase di compattazione, in quanto abbiamo visto che i dati sono tra loro autocorrelati; mentre useremo delle carte di controllo Shewhart per misure singole per tutte le altre variabili e fasi.

3.1 CENNI SULLE CARTE DI CONTROLLO

Nei prossimi due sottoparagrafi, prima dell'analisi effettiva delle carte di controllo, vi sono dei cenni introduttivi sulla costruzione ed interpretazione delle carte di controllo successivamente utilizzate.

3.1.1 Le carte di controllo di tipo Shewhart

Le carte di controllo di tipo Shewhart (Shewhart W. A., 1931) sono le carte di controllo più semplici, e sono dette carte di controllo senza memoria, in quanto la statistica di controllo utilizzata in questo tipo di carte non tiene conto delle informazioni provenienti dagli istanti temporali antecedenti all'ultimo. Questo tipo di carta di controllo è utilizzabile sotto due vincoli: i dati non siano autocorrelati e devono distribuirsi in modo approssimativamente normale.

Noi utilizzeremo due tipi di carte di controllo:

- la carta per le misure singole;
- la carta MR(2), basata sulle escursioni mobili.

La statistica di controllo nelle carte di tipo Shewhart, assume la seguente forma:

$$w = g(\underline{x})$$

con media $E[w] = \mu_w$ e deviazione standard $\sqrt{V[w]} = \sigma_w$.

Di volta in volta, la regola di decisione si basa sull'ultimo campione estratto all'istante *t*: $w_t = g(\underline{x_t})$

Per definire, poi la carta di controllo, servono i limiti di controllo e la linea centrale, così definiti:

- linea centrale $LC = \mu_w$;
- limite di controllo inferiore $LCL = \mu_w - L\sigma_w$;
- limite di controllo superiore $UCL = \mu_w + L\sigma_w$.

Dove L è una costante che definisce la distanza dei limiti di controllo dalla linea centrale, (solitamente si fissa L = 3 per la regola del 3-sigma).

A questo punto, per ogni istante temporale *t* si va a verificare se la nostra statistica di controllo w_t è compresa tra i due limiti di controllo (LCL, UCL): se la statistica è compresa tra i due limiti, si accetta l'ipotesi che il processo è in controllo statistico all'istante *t*, altrimenti si rifiuta tale ipotesi e si definisce il processo fuori controllo.

3.1.2 Le carte di controllo di tipo EWMA

Le carte di controllo di tipo EWMA (Exponentially Weighted Moving Average), invece sono delle carte di controllo più complesse, in quanto tengono conto anche delle informazioni provenienti da campioni precedenti all'ultimo estratto; sono quindi delle carte di controllo con memoria.

In più, le carte di controllo di tipo EWMA sono meno sensibili, rispetto alle Shewhart, per quanto riguarda la violazione del vincolo di normalità dei dati; ed in più questo tipo di carta riesce a considerare la correlazione tra le osservazioni passate.

La statistica di controllo delle carte di controllo EWMA, (Roberts, S. W., 1959), è definita come segue:

$$w_t = \sum_{j=0}^{t-1} \lambda(1-\lambda)^j w_{t-j} + (1-\lambda)^t w_0$$

dove $\lambda \in (0,1)$ e $w_0 = \theta_0$.

Per quel che riguarda i limiti di controllo, ne avremo di due tipi: variabili, per valori piccoli di *t*, che saranno definiti come:

$$LCL = \mu - L\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}[1-(1-\lambda)^{2t}]}$$
$$LC = \mu$$
$$UCL = \mu + L\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}[1-(1-\lambda)^{2t}]}$$

e asintotici:

$$LCL = \mu - L\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}}$$
$$LC = \mu$$
$$UCL = \mu + L\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}}$$

e nel caso μ o σ non siano noti, si possono approssimare con

$\hat{\mu} = \bar{\bar{x}} = \frac{\sum \bar{x_i}}{n}$ e $\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$ dove d_2 è una costante legata alla dimensione campionaria, opportunamente tabulata, (in particolare, con n = 2, d_2 = 1.128), mentre $\bar{R}$ è la media dei range campionari.

3.1.3 Le carte di controllo di tipo EWMA per dati autocorrelati

Nelle situazioni in cui i dati sono autocorrelati ed il processo può essere modellato per mezzo di un modello autoregressivo a medie mobili integrato, ARIMA(p,d,q), l'EWMA con un appropriato valore di λ, fornisce un buon previsore ad un passo. La statistica di controllo w_t quindi diventa $\hat{X}_{t+1}$, ovvero la previsione ad un passo, fatta al periodo t per il periodo $t+1$.

$$\hat{X}_{t+1}(t) = w_t = w_{t-1} + \lambda[X_t - \hat{X}_t(t-1)]$$

Da cui si ricava:

$$\hat{X}_{t+1}(t) = w_t = w_{t-1} + \lambda[X_t - w_{t-1}] = w_{t-1} + \lambda e_t$$

Se il processo sottostante è realmente un processo modellabile da un'ARIMA, gli errori di previsione ad un passo

$$e_t = X_t - \hat{X}_t(t-1) = X_t - w_{t-1}$$

formano una successione di variabili casuali, indipendenti ed identicamente distribuite, con media nulla e deviazione standard σ_P.

3.2 ANALISI DELLE CARTE DI CONTROLLO OTTENUTE

Segue ora un'analisi delle carte di controllo ottenute dai dati raccolti, divisi per variabile.

Come abbiamo visto in precedenza, i campioni raccolti per le variabili quota sfera, altezza totale e salto verticale nella fase di compattazione, (quindi quelli relativi alla prima fase), sono tra loro autocorrelati, per cui è conveniente utilizzare, per vedere se il processo è in controllo statistico, una carta di controllo EWMA, per la quale però abbiamo bisogno di definire il valore della costante λ.

Nel nostro caso, è stato adottato per la scelta della costante, la procedura per dati autocorrelati, che consiste nello scegliere il valore di λ che minimizza la somma degli errori quadratici di previsione ad un passo.
Sono state costruite tre tipi di carte EWMA:

a) la carta EWMA che non tiene conto dell'autocorrelazione dei dati;
b) la carta EWMA sugli errori di previsione ad un passo;
c) ed infine la carta EWMA per le previsioni ad un passo.

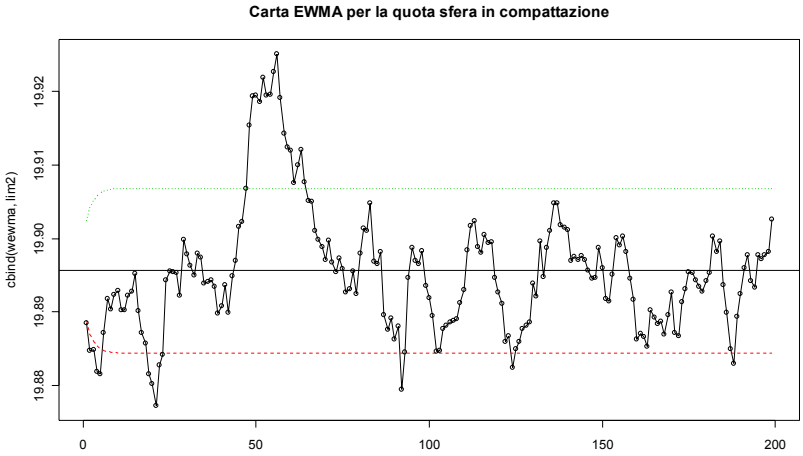
Per poter costruire queste ultime due carte di controllo, vi è però un ulteriore vincolo da rispettare: i dati devono poter essere modellati da un modello autoregressivo a media mobile integrato (ARIMA).
In seguito a delle verifiche, per ogni variabile, è risultato che i nostri dati possono essere adeguatamente modellati da un'ARIMA(1, 0, 1); i residui dell'adattamento risultano infatti essere tra loro indipendenti ed incorrelati.

Per tutte le fasi successive, e per tutte le altre variabili, essendo i dati di tutti i campioni privi di autocorrelazione, vengono usate solo carte di tipo Shewhart (consultabili in appendice).

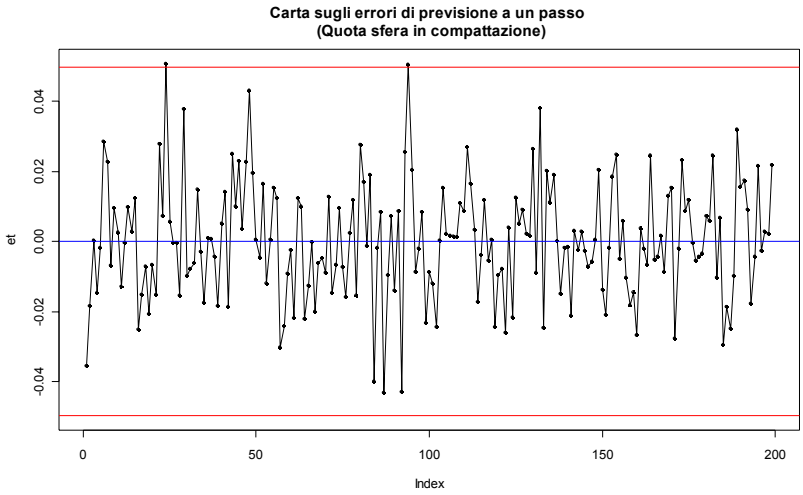
3.2.1 La quota sfera

Per la prima fase di compattazione, si è ottenuto che il valore di λ ottimale, per le carte EWMA, è pari a 0.2.
Come si può vedere dalla *figura 3.1*, la prima carta di controllo che non tiene conto dell'autocorrelazione delle osservazioni, evidenzia molti fuori controllo, (fin dal secondo campione) e sembra che da circa il 45° campione abbia inizio una deriva del processo molto evidente, mentre le carte per le previsioni ad un passo e sugli errori di previsione, (che tengono conto dell'autocorrelazione), segnalano solo due fuori controllo: circa al 22° campione ed al 94° campione.
Per quel che riguarda la prima fase, si conclude comunque che il processo non risulta non in controllo.

a)



b)



c)

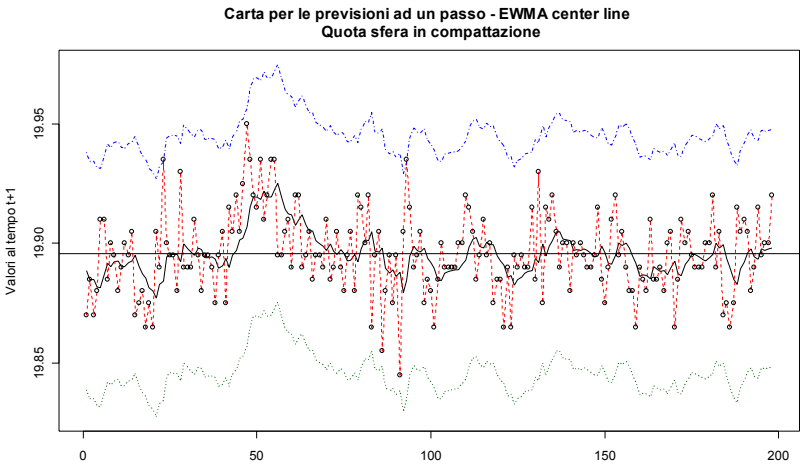


Figura 3.1: Carte EWMA per la quota sfera in compattazione (prima fase).

Dalle carte di controllo di tipo Shewhart, ottenute per le fasi successive, si nota che:

- per la seconda e la quarta fase, il processo risulta in controllo, in quanto né per le carte per le misure singole, né per le carte sulle escursioni mobili, vi sono dei fuori controllo;
- per la terza e la quinta fase, il processo non risulta in controllo statistico, in quanto troppo variabile, infatti le carte per le singole osservazioni non evidenziano alcun fuori controllo, mentre le carte per le escursioni mobili mostrano dei fuori controllo.

Si noti, infine, che nelle carte di tipo Shewhart, essendo in questo caso i campioni privi di un ordine temporale, non ha senso vedere se vi è un qualche andamento particolare della statistica test.

3.2.2 L'altezza totale

Vediamo ora le carte di controllo per la variabile altezza totale, fase per fase.

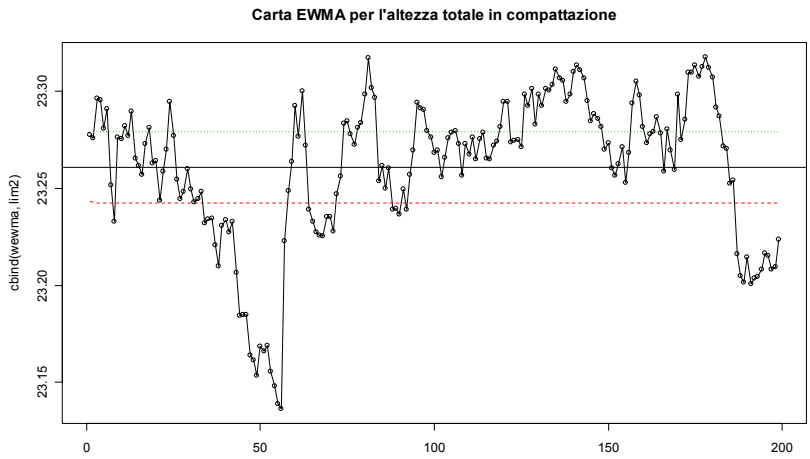
Come nel caso precedente, per la scelta del valore di λ, utile per le carte EWMA della prima fase, è stato adottato il metodo per dati autocorrelati; si è ottenuto così che il valore di λ ottimale che rende minima la somma degli errori quadratici di previsione ad un passo è pari a 0.7.

Osservando le carte di controllo di *figura 3.2*, si nota che:

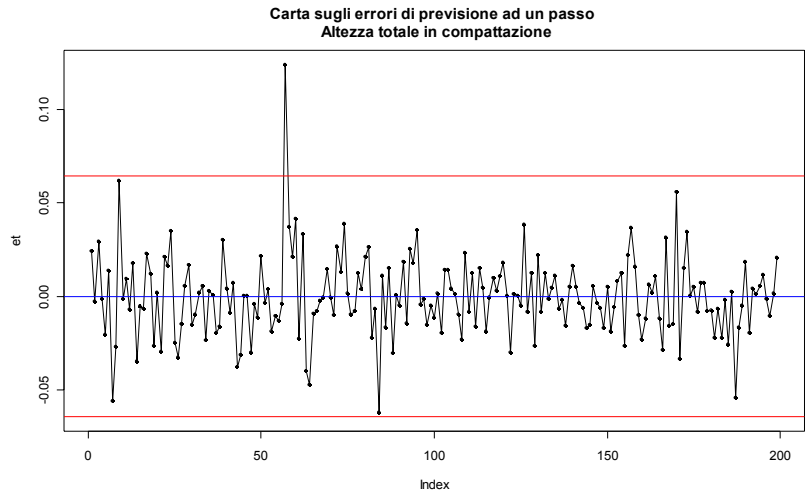
- la prima carta di controllo, non tenendo conto dell'autocorrelazione delle osservazioni, presenta valori della statistica di controllo per la maggior parte fuori i limiti di controllo;
- la carta sugli errori di previsione e la carta per le previsioni ad un passo, segnalano entrambe un solo fuori controllo in corrispondenza del 58° campione, corrispondente tra l'altro al picco più evidente della prima carta EWMA.

Quindi la variabile altezza totale, nella prima fase, sembrerebbe non stabile in media.

a)



b)



c)

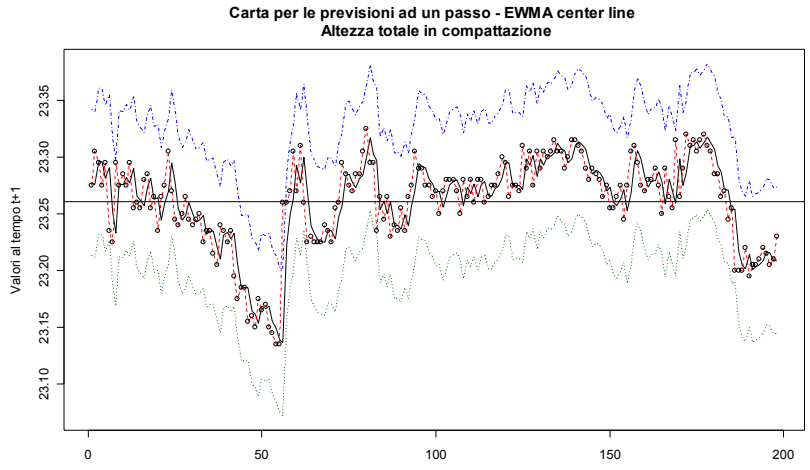


Figura 3.2: Carte EWMA per l'altezza totale dopo compattazione (prima fase)

Per le fasi successive, dall'analisi delle carte di controllo di tipo Shewhart risulta che:

- il processo nella seconda e quinta fase risulta in controllo statistico, in quanto sia le carte per le misure singole sia le carte sulle escursioni mobili, non segnalano alcun fuori controllo;
- il processo nella terza e nella quarta fase risulta stabile in media ma mostra dei fuori controllo in varianza.

3.2.3 Il salto verticale

Per la scelta della costante λ delle carte EWMA, si continua ad usare il valore ottimale che rende minima la somma degli errori di previsione ad un passo al quadrato; il valore così ottenuto è $\lambda = 0.625$.

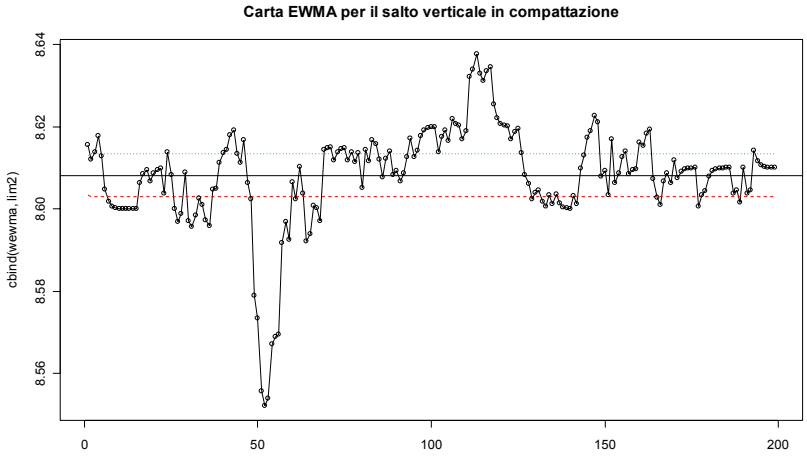
Dalla *figura 3.3*, si può vedere che la prima carta EWMA, non tenendo conto dell'autocorrelazione delle osservazioni, presenta molti fuori controllo, parecchi dei quali sono probabilmente dei falsi allarmi.

La carta sugli errori di previsione e la carta per le previsione ad un passo mostrano che il processo non è in controllo statistico, infatti in entrambe le carte in corrispondenza del 49°, 51°, 57° e 69° campione vi sono dei fuori controllo.

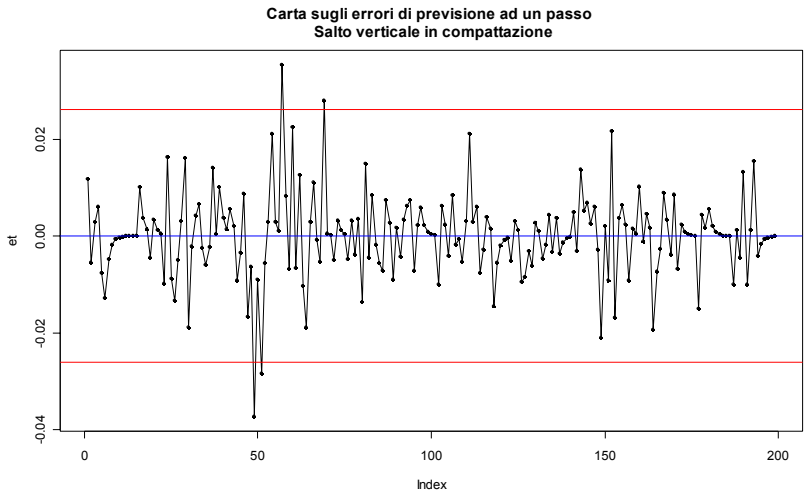
In tutte le fasi successive alla prima, dalle carte Shewhart ottenute, si nota che il processo non è in controllo statistico, infatti:

- nella seconda fase, (prima sinterizzazione), la carta sulle misure singole evidenzia ben quattro fuori controllo;
- nella terza, quarta e quinta fase, (coniatura, seconda sinterizzazione e trattamento termico), le rispettive carte per le escursioni mobili segnalano dei fuori controllo, dovuti all'elevata variabilità del processo.

a)



b)



c)

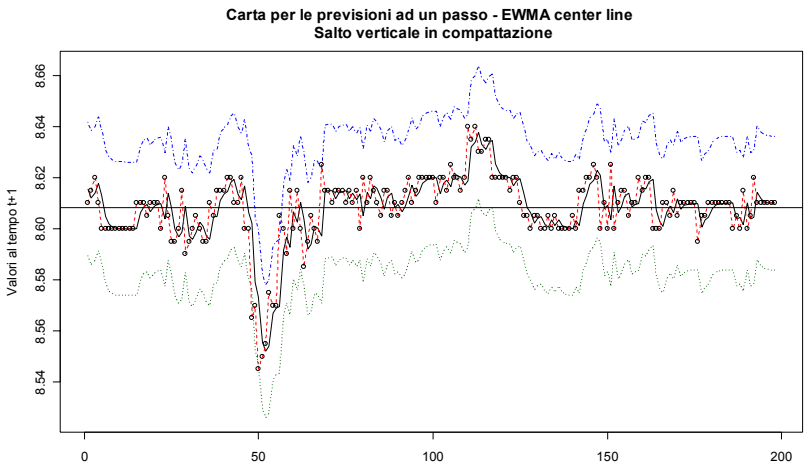


Figura 3.3: Carta EWMA per il salto in compattazione.

3.2.4 Il diametro interno misurato all'altezza del mozzo.

Passiamo ora alla variabile relativa al diametro interno misurato all'altezza del mozzo.

Nella prima fase, (compattazione), il processo risulta fuori controllo guardando sia la carta Shewhart per le misure singole sia quella per le escursioni mobili, infatti in entrambe le carte vi sono dei campioni fuori dai limiti di controllo.

Per quel che riguarda la seconda fase, invece, il processo non risulta in controllo statistico, in quanto troppo variabile, come si nota dalla carta per le escursioni mobili che lancia un allarme in corrispondenza del 19° campione.

Nella terza e quarta fase, (rispettivamente: coniatura e seconda sinterizzazione), il processo risulta in controllo; mentre il processo risulta completamente fuori controllo nell'ultima fase, vi sono infatti dei fuori controllo sia per la carta di controllo per le misure singole, sia per la carta per le escursioni mobili.

3.2.5 Il diametro interno misurato a metà foro

Per questa variabile, sia nella prima che nella seconda fase, il processo risulta essere completamente fuori controllo, infatti in tutti gli schemi applicati (carta per le misure singole e carta per le escursioni mobili) di entrambe le fasi vi sono molti fuori controllo.

In particolare nella seconda fase il processo presenta una variabilità molto elevata, come evidenzia la carta per le escursioni mobili.

Nella fasi successive, invece, il processo risulta sempre in controllo statistico.

3.2.6 Il diametro interno misurato all'altezza della dentatura.

Procedendo con l'analisi, vi è il diametro interno misurato questa volta all'altezza della dentatura.

Nella prima fase, il processo non risulta in controllo statistico, in quanto vi sono diversi fuori controllo nella carta per le misure singole, e si nota che la variabilità

del processo è abbastanza elevata, sebbene la carta per le escursioni mobili non segnali alcun fuori controllo.
Il processo non risulta in controllo neppure nella seconda fase, in questo caso infatti vi sono dei fuori controllo sia nella carta per le misure singole, sia in quella sulle escursioni mobili, dovuti all'elevata variabilità del processo.
Nella terza e nella quarta fase, le cose migliorano, infatti il processo in queste due fasi risulta in controllo, seppure con una elevata variabilità nella terza fase.
Con la quinta ed ultima fase, il processo torna nuovamente fuori controllo, la carta per le escursioni mobili, infatti, lancia un allarme per segnalare una elevata variabilità del processo.

3.2.7 Il diametro esterno.

Come per le ultime variabili, anche per il diametro esterno vengono utilizzate solamente delle carte di controllo di tipo Shewhart.

Il processo, almeno inizialmente, sembra stabile, come si nota dalle carte di controllo relative alla prima fase.
Le cose peggiorano, poi, nella seconda e nella terza fase, dove si realizzano dei fuori controllo nelle carte sulle escursioni mobili.
Nelle ultime due fasi, ovvero nella quarta e quinta fase, il processo ritorna in controllo, e si nota, poi, una diminuzione della variabilità del processo nell'ultima fase, rispetto alla precedente.

3.3 OSSERVAZIONI

Da quanto appena visto, si denota che in quasi tutte le fasi e per quasi tutte le variabili il processo risulta non stabile né in media né in varianza, per cui gli indicatori della performance del processo che andremo a calcolare nel capitolo successivo, non saranno misure pienamente attendibili.

Nel calcolo di tali indicatori infatti non sono soddisfatte due assunzioni molto importanti:

- la normalità dei dati;
- il controllo statistico del processo in analisi.

4. ANALISI DELLA CAPABILITY

Essendo il fine ultimo di questa relazione, quello di fare un'analisi sulla performance del processo produttivo in tutte le sue fasi, ha senso cercare di sintetizzare l'andamento del processo con degli appropriati indicatori.
Questi indicatori sono gli indici di capacità C_p, C_{pk}, P_p e P_{pk}, che vedremo di seguito.

4.1 CENNI SUI CLASSICI INDICI DI CAPACITÀ DEL PROCESSO

Gli indici di capacità del processo sono degli indici che sintetizzano qual è la capacità, del processo in esame, di lavorare secondo le specifiche.
Nello specifico, nei prossimi paragrafi verranno utilizzati essenzialmente quattro tipi di indici di capacità del processo:

- C_p: indice di capacità potenziale del processo, a breve termine;
- C_{pk}: indice di capacità effettiva del processo, a breve termine;
- P_p: indice di capacità potenziale del processo, a lungo termine;
- P_{pk}: indice di capacità effettiva del processo, a lungo termine.

Tra questi, i primi due indici, C_p e C_{pk}, sono degli indici che si basano sulla stima della varianza a breve termine, mentre il Pp e il Ppk sono indici che si basano sulla stima della varianza a lungo termine.
In particolare:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\hat{\sigma}} \qquad \text{con} \qquad \hat{\sigma} = \frac{\overline{R}}{d_2} \qquad \text{dove } \overline{R} \text{ è il range medio}$$

$$\text{o} \qquad \hat{\sigma} = \frac{\overline{MR(2)}}{d_2} \qquad \text{dove } \overline{MR(2)} \text{ è l'esc. mobile media}$$

e d_2 è una costante appositamente tabulata in funzione dalla dimensione campionaria.
Questo indice, C_p, ha come punto debole, il fatto che non tiene conto della centratura del processo rispetto ai limiti di specifica (LSL, USL), ma tiene conto solo della sua variabilità; ecco perché questo indice viene detto indice della capacità potenziale del processo.

Abbiamo invece:

$$C_{pk} = \frac{\min(-Z_{LSL}, Z_{USL})}{3} \qquad \text{con} \qquad Z_{LSL} = \frac{LSL - \mu}{\hat{\sigma}} \qquad \text{e} \qquad Z_{USL} = \frac{USL - \mu}{\hat{\sigma}}$$

dove $\mu = \overline{\overline{x}}$, ovvero la media delle medie

Questo indice, C_{pk}, è detto indice di capacità effettiva del processo, proprio perché a differenza del precedente tiene conto oltre che della variabilità anche della centratura del processo rispetto ai limiti di tolleranza.

Per quel che riguarda l'interpretazione di tali indici, si ha:

$C_p < 1$	processo con bassa capacità
$1 < C_p < 1.6$	processo con media capacità
$C_p > 1.6$	processo con alta capacità

e

$C_p = C_{pk}$	processo centrato sul valore nominale
$C_{pk} < C_p$	processo fuori centro

Vi sono poi gli indici P_p e P_{pk}, questi indici sono calcolati nello stesso modo rispettivamente del C_p e del C_{pk}, con l'unica differenza che la stima di σ è posta pari a:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{V(X)}$$

ovvero $\hat{\sigma}$ viene ottenuta come la deviazione standard di tutte le osservazioni relative ad una determinata caratteristica in una particolare fase.

Gli indici, che così si ottengono, danno un'idea di come il processo si comporta nel lungo termine.

Per avere un'idea, poi, se il processo è stabile nel tempo, si può fare il rapporto tra i due indici di capacità effettiva:

$$\frac{P_{pk}}{C_{pk}} \approx 1$$

Se il processo è stabile nel tempo, il rapporto sopra riportato dovrebbe essere approssimativamente pari a 1.

4.2 GLI INDICI DI CAPACITÀ A VARIANZA PONDERATA PER GENERICI PROCESSI NON-NORMALI

Tutti gli indici di capacità, visti finora, sono basati sull'importante assunzione che le osservazioni si distribuiscono in modo normale; tuttavia, nei capitoli precedenti, in particolare nel secondo capitolo riguardante l'analisi esplorativa dei dati, è stato messo in evidenza che i dati si distribuiscono, nella maggior parte dei casi, in modo non-normale: la violazione di questo vincolo, rende gli indici poco affidabili.

Per ovviare questo problema, si possono utilizzare gli indici di capacità a varianza ponderata per generici processi non-normali.
Il metodo della varianza ponderata (Choobineh e Ballard, 1987, Bai e Choi, 1995) è stato introdotto per la prima volta per la costruzione di carte di controllo quando la popolazione in esame è asimmetrica.
L'idea principale dei vari metodi della varianza ponderata è di dividere una distribuzione asimmetrica in due sotto-distribuzioni normali, utilizzando la sua media come limite di divisione; per esempio, le due nuove distribuzioni create dalla distribuzione originaria, hanno la stessa media ma differenti deviazioni standard.

La *figura 4.8* illustra l'idea principale del nuovo metodo a varianza ponderata, dove USL e LSL sono rispettivamente il limiti di specifica superiore ed inferiore.

Per una popolazione con media pari a μ e deviazione standard pari a σ, ci sono n_1 osservazioni, delle totali n, che sono inferiori od uguali a μ; come ci sono anche n_2 osservazioni delle n totali che sono maggiori di μ.

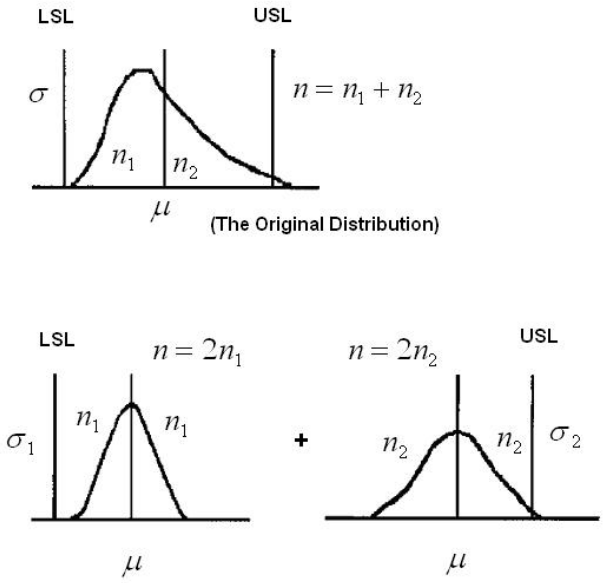


Figura 4.8: Idea alla base del nuovo metodo a varianza ponderata.

Le due nuove distribuzioni dovrebbero avere la stessa media μ, ma differenti deviazioni standard σ_1 e σ_2. Se la distribuzione originaria è simmetrica, allora n_1 è approssimativamente uguale a n_2, quindi $n_1 \approx n_2 \approx \frac{n}{2}$, e $\sigma_1 \approx \sigma_2 \approx \sigma$.

I parametri μ, σ_1 e σ_2 sono solitamente ignoti, per cui occorre stimarli:

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad \hat{\sigma}_1 = s_1^{\,2} \qquad \hat{\sigma}_2 = s_2^{\,2}$$

I parametri $\sigma_1^{\,2}$ e $\sigma_2^{\,2}$ vengono stimati in maniera diversa a seconda dei metodi. Qui di seguito vengono esposti il metodo di base di Choobineh e Ballard (1987) e la variante proposta da Bai e Choi (1995).

Il metodo di base propone: $s_1^{\,2} = \frac{2\sum_{i=1}^{n_1}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{2n_1 - 1}$ ed $s_2^{\,2} = \frac{2\sum_{i=1}^{n_2}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{2n_2 - 1}$

mentre Bai e Choi propongono:

$$s_1^{\,2}(B\,\&\,C) = 2(1-P_X)\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}{n-1} \qquad \text{ed} \qquad s_2^{\,2}(B\,\&\,C) = 2P_X\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}{n-1}$$

dove $P_X = \Pr(X \le x) \approx \frac{n_1}{n}$.

Gli indici di capacità, precedentemente visti, subiscono delle modifiche, quando viene usato uno dei metodi a varianza ponderata.

L'unica differenza, tra gli indici originali basati sulla normalità delle osservazioni e gli indici di capacità che usano la varianza ponderata, sono dunque i denominatori.

Nell'indice originale C_p, il denominatore rappresenta la lunghezza dei limiti $\pm 3\sigma$, mentre nel metodo a varianza ponderata l'approssimazione sarà $3\sigma_1 + 3\sigma_2$.

Si ottengono così i nuovi indici:

$$\hat{C}_p(WV) = \frac{(USL-LSL)}{3(s_1+s_2)} \qquad \text{e} \qquad \hat{C}_{pk}(WV) = \min\left[\frac{USL-\bar{x}}{3s_2}, \frac{\bar{x}-LSL}{3s_1}\right]$$

Il vantaggio nell'utilizzo del metodo a varianza ponderata per modificare gli indici di capacità di processo basati sulla normalità dei dati, consiste nel fatto che gli indici di capacità basati sulla varianza ponderata riflettono i valori di asimmetria e curtosi della distribuzione, in quanto le loro deviazioni standard, s_1 e s_2, sono "aggiustate" per il valore degli indici di curtosi e di asimmetria.

4.3 ANALISI DEGLI INDICI DI CAPACITÀ DEL PROCESSO.

Vediamo ora gli indici di capability ottenuti dai dati del nostro processo in esame, divisi per variabile.

4.3.1 La quota sfera

Nella *tabella 4.1*, sono raccolti gli indici di *capability* relativi alla variabile quota sfera, divisi per fase: i primi sono gli indici che si basano sul vincolo di normalità delle osservazioni, mentre gli ultimi quattro sono basati sulla varianza ponderata per processi non-normali, (WV: metodo di base; B&C: variante di Bai e Choi).

	C_p	C_{pk}	P_p	P_{pk}	P_{pk} / C_{pk}	C_p(WV)	C_{pk}(WV)	C_p(B&C)	C_{pk}(B&C)
Comp.	1,47	0,72	1,14	0,56	0,777778	1,14	0,55	1,14	0,57
I° Sint.	1,24	0,18	1,32	0,19	1,055556	1,33	0,19	1,33	0,19
Coniat.	1,17	0,71	1,14	0,7	0,985915	1,13	0,76	1,15	0,76
II° Sint.	0,61	0,35	0,76	0,44	1,257143	0,76	0,51	0,77	0,48
Tratt. Term.	0,96	-0,01	0,94	-0,01	1	0,93	-0,01	0,94	-0,01

Tabella 4.1: Indici di capability per la quota sfera

	$\hat{\sigma}_{within}$	$\hat{\sigma}_{overall}$	s_1(WV)	s_2(WV)	s_1(B&C)	s_2(B&C)
Comp.	0,0158594	0,0204746	0,01998153	0,02089931	0,02081851	0,02009864
I° Sint.	0,0267767	0,0252069	0,02523705	0,02493178	0,02557531	0,02457196
Coniat.	0,0285859	0,0292334	0,03205255	0,02674703	0,03132515	0,02665655
II° Sint.	0,054458	0,0435788	0,03790988	0,04995264	0,03973742	0,04669701
Tratt. Term.	0,0347373	0,0356381	0,03027409	0,04160274	0,03249668	0,03818813

Tabella 4.2: Stime della deviazione standard utilizzate nel calcolo degli indici per la quota sfera

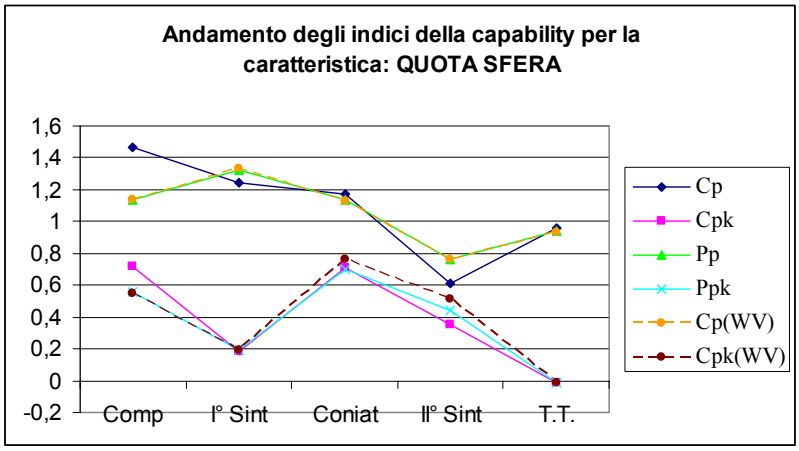


Figura 4.1: Andamento degli indici della capability per la quota sfera

Guardando i rapporti tra gli indici di capacità effettiva, il processo sembra essere stabile nel tempo; per quel che riguarda la capacità, in ogni fase tutti gli indici sembrano indicare invece che il processo ha una capacità insoddisfacente.

Tra l'altro, dalla *figura 4.1* si nota che tra le varie fasi vi è una diminuzione della capacità effettiva del processo, mentre vi è una ripresa per quanto riguarda la capacità potenziale. Questo sta ad indicare che il processo durante le varie fasi, si sposta e più precisamente si decentra rispetto ai limiti di tolleranza, ma in compenso riduce la sua variabilità.

Si noti, poi, che gli indici di capacità basati sulla varianza ponderata, sono molto simili tra loro, come sono molto simili anche gli indici di capacità a lungo termine P_p e P_{pk}.

Guardando la *tabella 4.2*, dove sono riportate le varie stime della varianza, utilizzate per la costruzione dei precedenti indici, si nota che il processo effettivamente non è simmetrico, le deviazioni standard σ_1 ed σ_2 stimate, infatti sono differenti. Gli indici di capacità basati sulle varianze ponderate, sono dunque più adeguati.

4.3.2 L'altezza totale

Nella tabella seguente, *tabella 4.3*, vi sono gli indici della *capability* della variabile altezza totale, con le rispettive stime della varianza utilizzate nella *tabella 4.4*, seguita da un grafico sintetizzante l'andamento di tali indici tra le varie fasi del processo, *figura 4.2*.

	C_p	C_{pk}	P_p	P_{pk}	P_{pk} / C_{pk}	C_p(WV)	C_{pk}(WV)	C_p(B&C)	C_{pk}(B&C)
Comp.	2,85	2,25	0,82	0,65	0,288889	0,82	0,8	0,82	0,68
I° Sint.	3,23	-1,82	3,43	-1,93	1,06044	3,46	-2,06	3,45	-1,9
Conia.	1,5	0,49	1,25	0,41	0,836735	1,26	0,46	1,26	0,42
II° Sint.	1,22	0,94	1,06	0,82	0,87234	1,07	0,76	1,07	0,82
Tratt. Term.	1,54	0,71	1,47	0,68	0,957746	1,39	0,94	1,49	0,83

Tabella 4.3: Indici della capability per l'altezza totale.

	$\hat{\sigma}_{within}$	$\hat{\sigma}_{overall}$	s_1(WV)	s_2(WV)	s_1(B&C)	s_2(B&C)
Comp.	0,0117164	0,0405757	0,04798984	0,03300799	0,04224668	0,03877943
I° Sint.	0,0206253	0,0194306	0,0200839	0,01848086	0,01894111	0,01971453
Coniat.	0,0443262	0,0531566	0,058346	0,04729963	0,05393344	0,05181758
II° Sint.	0,0546389	0,0627451	0,05696401	0,06744673	0,06242579	0,06242579
Tratt. Term.	0,0434216	0,045499	0,06274396	0,03302713	0,05200835	0,0373285

Tabella 4.4: Stime della deviazione standard utilizzate nel calcolo degli indici per l'altezza totale.

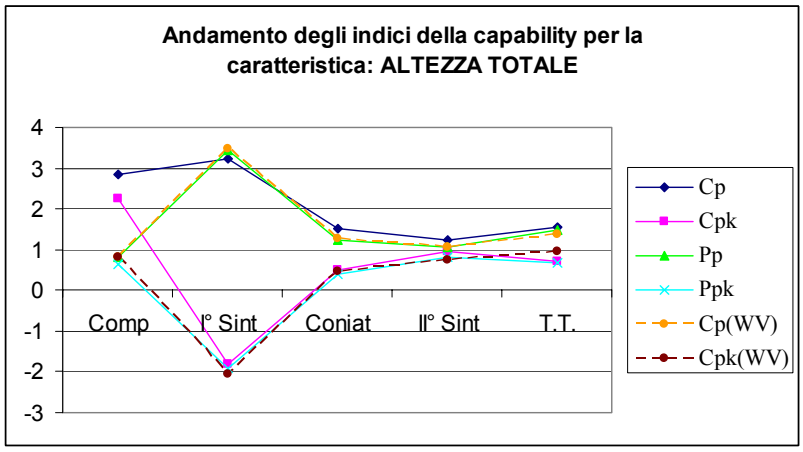


Figura 4.2: Andamento degli indici della capability per l'altezza totale.

Il processo, ad eccezione della fase di compattazione, sembra abbastanza stabile nel tempo; per quel che riguarda la capacità potenziale, gli indici sono abbastanza soddisfacenti, mentre lo sono di meno per quel che riguarda la capacità effettiva. Questo sta ad indicare, come per la variabile precedente, che il processo ha una buona variabilità, mentre non è ben centrato sul valore nominale.

Per quel che riguarda l'andamento, gli indici di capacità potenziale hanno prima una crescita, per avere poi una fase di decrescita graduale; mentre per quel che riguarda gli indici di capacità effettiva, si nota il fenomeno esattamente opposto.

Come per la caratterista precedente, anche in questo caso, gli indici calcolati col metodo della varianza ponderata assumono gli stessi valori degli indici di capacità di lungo termine.

Le stime della varianza, inoltre ci riconfermano che il processo in esame non è normale, bensì asimmetrico.

4.3.3 Il salto verticale

Seguono ora, la *tabella 4.5* con gli indici di capacità relativi alla variabile salto verticale, con le relative stime della varianza nella *tabella 4.6*, ed infine il grafico sintetizzante l'andamento dei suddetti indici nelle varie fasi del processo, *figura 4.3*.

	C_p	C_{pk}	P_p	P_{pk}	P_{pk} / C_{pk}	C_p(WV)	C_{pk}(WV)	C_p(B&C)	C_{pk}(B&C)
Comp.	4,56	3,82	1,21	1,01	0,264398	1,15	1,04	1,22	1,2
I° Sint.	2,63	-1,05	1,99	-0,8	0,761905	1,87	-0,88	2,13	-0,62
Coniat.	1,56	-0,36	1,58	-0,36	1	1,54	-0,31	1,6	-0,32
II° Sint.	1,67	0,39	1,63	0,38	0,974359	1,58	0,44	1,65	0,45
Tratt. Term.	1,67	-0,55	1,56	-0,51	0,927273	1,56	-0,54	1,57	-0,55

Tabella 4.5: Indici di capability relativi al salto verticale.

	$\hat{\sigma}_{within}$	$\hat{\sigma}_{overall}$	s_1(WV)	s_2(WV)	s_1(B&C)	s_2(B&C)
Comp.	0,003653	0,0137989	0,0186734	0,01021219	0,01570198	0,01156667
I° Sint.	0,0063323	0,0083725	0,01019804	0,007585133	0,004997959	0,01066752
Coniat.	0,0106745	0,0105535	0,009276562	0,01240111	0,00890934	0,01187912
II° Sint.	0,0099508	0,010226	0,01221259	0,008840599	0,01151056	0,008632922
Tratt. Term.	0,0099508	0,010699	0,01125832	0,01013882	0,01126512	0,009985459

Tabella 4.6: Stime della deviazione standard utilizzate nel calcolo degli indici per il salto vert.

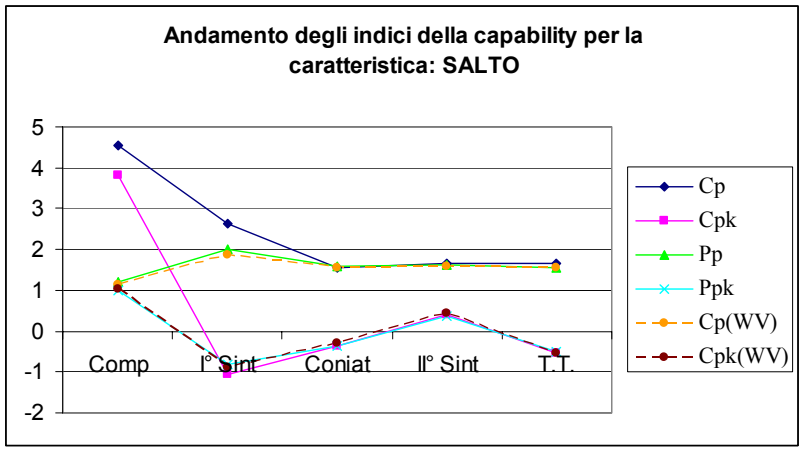


Figura 4.3: Andamento degli indici di capability per il salto verticale

Anche in questo caso, il processo sembra essere abbastanza stabile nel tempo, eccezion fatta sempre per la fase di compattazione.

Gli indici di capacità potenziale risultano generalmente buoni, mentre gli indici di capacità effettiva sembrano indicare che vi siano dei margini di miglioramento del processo.

Quindi anche per il salto verticale, il processo ha complessivamente una buona variabilità, mentre è decentrato rispetto alle tolleranze.

Per quel che riguarda l'andamento degli indici di capacità potenziale vi è un trend decrescente, mentre per gli indici di capacità effettiva vi è un andamento discontinuo.

Sul confronto, tra i vari metodi di calcolo degli indici, si notano le stesse cose viste per le variabili precedenti.

4.3.4 Il diametro interno misurato all'altezza del mozzo.

Abbiamo, ora, gli indici di capacità del processo per la caratteristica diametro interno misurato all'altezza del mozzo, *tabella 4.7*, seguiti dalla *tabella 4.8* con le stime delle varianze, e da un grafico con l'andamento di tali indici al variare delle fasi di produzione, *figura 4.4*.

	C_p	C_{pk}	P_p	P_{pk}	P_{pk} / C_{pk}	C_p(WV)	C_{pk}(WV)	C_p(B&C)	C_{pk}(B&C)
Comp.	3,89	-1,64	3,13	-1,32	0,804878	3,13	-1,16	3,17	-1,25
I° Sint.	2,88	1,49	2,73	1,42	0,95302	2,74	1,14	2,75	1,37
Coniat.	1,69	1,41	1,43	1,19	0,843972	1,41	1,34	1,44	1,34
II° Sint.	1,27	-1,01	1,22	-0,97	0,960396	1,22	-1,05	1,22	-1,02
Tratt. Term.	0,81	0,65	0,79	0,63	0,969231	0,79	0,55	0,79	0,61

Tabella 4.7: Indici della capability per il diametro interno misurato all'altezza del mozzo.

	$\hat{\sigma}_{within}$	$\hat{\sigma}_{overall}$	s_1(WV)	s_2(WV)	s_1(B&C)	s_2(B&C)
Comp.	0,0012839	0,0015967	0,001382916	0,001813529	0,001473651	0,001685184
I° Sint.	0,0017369	0,0018308	0,001795033	0,001852244	0,001747147	0,001892986
Coniat.	0,0029671	0,0035008	0,004352612	0,00276165	0,003815393	0,003115255
II° Sint.	0,0039441	0,0041088	0,003774478	0,004428608	0,003920939	0,00424823
Tratt. Term.	0,0061695	0,0063275	0,00726476	0,005335687	0,006542286	0,006038256

Tabella 4.8: Stime della dev. standard utilizzate nel calcolo degli indici per il diam. int ("mozzo").

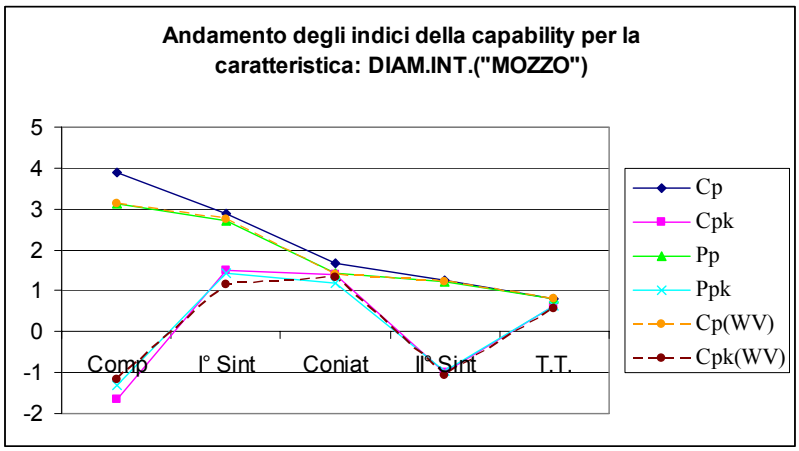


Figura 4.4: Andamento degli indici della capability per il diam. int. all'altezza del mozzo

Dal rapporto tra gli indici di capacità effettiva, sembra che il processo sia abbastanza stabile nel tempo.

Gli indici di capacità potenziale partono, dalla prima fase, molto elevati, per arrivare gradualmente a dei valori di capacità abbastanza bassi; quelli di capacità effettiva invece, hanno un andamento ciclico, ma comunque sempre molto bassi.

Anche in questo caso, le stime della varianza mostrano che il processo è asimmetrico e che quindi sono più affidabili gli indici che si basano sul calcolo della varianza ponderata, rispetto agli indici classici.

4.3.5 Il diametro interno misurato a metà foro

Vediamo, ora, con le *tabelle 4.9-4.10* e la *figura 4.5*, gli indici di capability per il diametro interno misurato a metà foro con le loro rispettive stime della varianza utilizzate ed il loro andamento nelle varie fasi del processo.

	C_p	C_{pk}	P_p	P_{pk}	P_{pk} / C_{pk}	C_p(WV)	C_{pk}(WV)	C_p(B&C)	C_{pk}(B&C)
Comp.	3,8	-0,07	2,44	-0,04	0,571429	2,44	-0,04	2,46	-0,04
I° Sint.	2,85	1,94	1,89	1,28	0,659794	1,87	1,46	1,9	1,41
Coniat.	1,55	1,1	1,28	0,91	0,827273	1,28	0,82	1,29	0,88
II° Sint.	1,05	-0,75	0,99	-0,71	0,946667	0,99	-0,74	1	-0,74
Tratt. Term.	0,95	-0,19	0,96	-0,19	1	0,96	-0,16	0,96	-0,18

Tabella 4.9: Indici della capability per il diam. int. misurato a metà foro.

	$\hat{\sigma}_{within}$	$\hat{\sigma}_{overall}$	s_1(WV)	s_2(WV)	s_1(B&C)	s_2(B&C)
Comp.	0,0013145	0,0020507	0,001730456	0,002374157	0,001892676	0,002164358
I° Sint.	0,001755	0,0026476	0,003007633	0,002328767	0,002837072	0,002414243
Coniat.	0,0032204	0,0039047	0,004340716	0,003450891	0,004037279	0,00372624
II° Sint.	0,0047402	0,0050417	0,004792938	0,005266731	0,004811232	0,005212838
Tratt. Term.	0,005283	0,0052247	0,006171955	0,004285281	0,005501169	0,004876265

Tabella 4.10: Stime della dev. Stand. utilizzate nel calcolo degli indici per il diam. int ("mezzo foro").

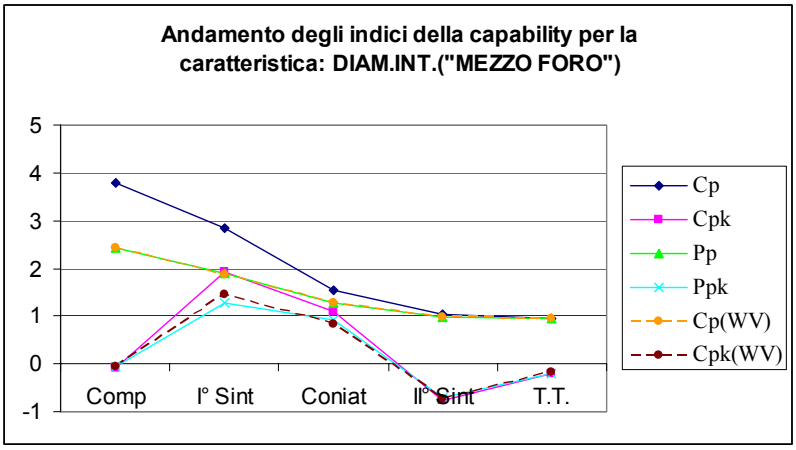


Figura 4.5: Andamento degli indici della capability per il diam. int. misurato a metà foro.

Si può notare un progressivo trend decrescente per tutti gli indici; gli indici relativi all'ultima fase sono in particolare abbastanza insoddisfacenti. Per quel che riguarda la stabilità del processo invece, si vede fase dopo fase, un progressivo aumento della stabilità.

Come per le variabili precedenti, anche in questo caso gli indici basati sulla varianza ponderata, risultano preferibili in quanto più affidabili.

4.3.6 Il diametro interno misurato all'altezza della dentatura

Nella *tabella 4.11* e nella *figura 4.6* abbiamo rispettivamente gli indici di *capability* per il diametro interno misurato all'altezza della dentatura, ed il loro andamento durante le varie fasi del processo produttivo; nella *tabella 4.12*, invece, abbiamo la stime della varianza, utilizzate per il calcolo dei suddetti indici.

	C_p	C_{pk}	P_p	P_{pk}	P_{pk} / C_{pk}	C_p(WV)	C_{pk}(WV)	C_p(B&C)	C_{pk}(B&C)
Comp.	3,8	-0,36	3,41	-0,33	0,916667	3,43	-0,3	3,44	-0,32
I° Sint.	2,54	-0,3	1,99	-0,23	0,766667	2	-0,22	2	-0,23
Coniat.	1,47	-0,09	1,25	-0,07	0,777778	1,23	-0,09	1,27	-0,08
II° Sint.	0,9	0,28	1,06	0,33	1,178571	1,06	0,31	1,06	0,31
Tratt. Term.	1,01	0,72	1,05	0,75	1,041667	1,05	0,74	1,06	0,73

Tabella 4.11: Indici della capability per il diam. int. misurato all'altezza della dentatura

	$\hat{\sigma}_{within}$	$\hat{\sigma}_{overall}$	s_1(WV)	s_2(WV)	s_1(B&C)	s_2(B&C)
Comp.	0,0013145	0,0014673	0,001339341	0,001576734	0,001405354	0,001502386
I° Sint.	0,0019721	0,0025164	0,002365397	0,002634465	0,002503549	0,002503549
Coniat.	0,0034014	0,0039929	0,004681486	0,0034243	0,00435172	0,003553165
II° Sint.	0,0055543	0,0047357	0,005003293	0,004449036	0,004896484	0,00451925
Tratt. Term.	0,0049392	0,0047581	0,004851406	0,004631788	0,004919612	0,004540596

Tabella 4.12: Stime della dev. standard utilizzate nel calcolo degli indici per il diam. int ("denti").

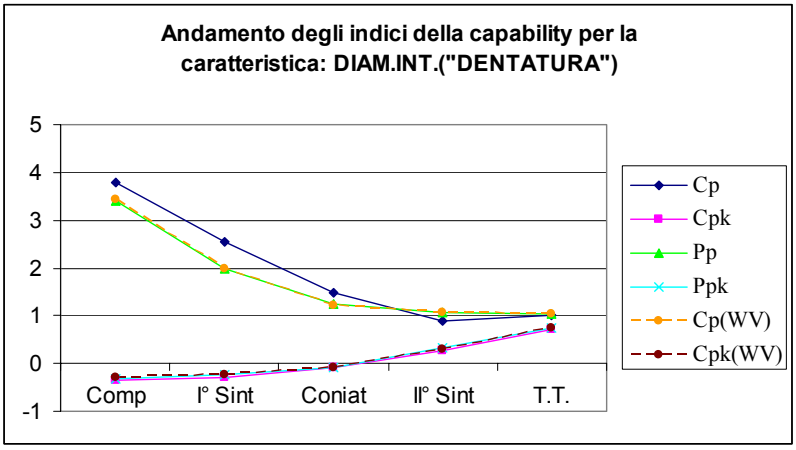


Figura 4.6: Andamento degli indici della capability per il diam. int. misurato all'alt. della dentat.

Dal rapporto degli indici di capacità effettivi, il processo sembra essere decisamente stabile nel tempo.

Per quel che riguarda gli indici di capacità potenziali, vi è un progressivo abbassamento della capacità.

Per gli indici di capacità effettivi, invece, vi è un lento ma continuo aumento della *capability* fino ad arrivare ad una capacità circa pari a 0.75, purtroppo ancora bassa.

Questo sta ad indicare che all'avanzare delle varie fasi, il processo aumenta di variabilità ma tende a centrarsi rispetto alle tolleranze.

In questo caso, le stime delle deviazioni standard sono abbastanza simili tra loro, questo ha portato ad avere degli indici di capacità abbastanza simili nonostante il diverso metodo di calcolo.

Questo dovuto al fatto che, come già visto nella fase esplorativa dei dati, le osservazioni si distribuiscono in modo abbastanza normale.

4.3.7 Il diametro esterno

Infine, vediamo gli indici di *capability* della variabile diametro esterno, vedi *tabella 4.13*, il loro andamento tra le varie fasi, *figura 4.7,* e le stime delle deviazioni standard utilizzate per il calcolo di tali indici, *tabella 4.14*.

	C_p	C_{pk}	P_p	P_{pk}	P_{pk} / C_{pk}	C_p(WV)	C_{pk}(WV)	C_p(B&C)	C_{pk}(B&C)
Comp.	12,39	9,78	11,63	9,19	0,939673	11,3	7,31	11,84	8,23
I° Sint.	10,53	9,16	8,21	7,14	0,779476	8,19	7,78	8,26	7,65
Coniat.	5,5	1,83	4,92	1,64	0,896175	4,94	1,68	4,94	1,65
II° Sint.	2,81	2,75	2,98	2,91	1,058182	2,98	2,65	3	2,9
Tratt. Term.	2,77	1,99	3,08	2,21	1,110553	3,05	2,53	3,1	2,42

Tabella 4.13: Indici della capability per il diametro esterno.

	$\hat{\sigma}_{within}$	$\hat{\sigma}_{overall}$	s_1(WV)	s_2(WV)	s_1(B&C)	s_2(B&C)
Comp.	0,0053803	0,00573	0,004595049	0,007206141	0,00486473	0,006393507
I° Sint.	0,0063323	0,0081226	0,007454102	0,008818585	0,007580857	0,00855236
Coniat.	0,0121219	0,0135628	0,01377516	0,01320637	0,01349376	0,01349376
II° Sint.	0,023701	0,0223564	0,01911542	0,02569365	0,02086544	0,02353939
Tratt. Term.	0,0240628	0,0216585	0,02477623	0,01888826	0,02320816	0,01974929

Tabella 4.14: Stime della dev. standard utilizzate nel calcolo degli indici per il diametro esterno.

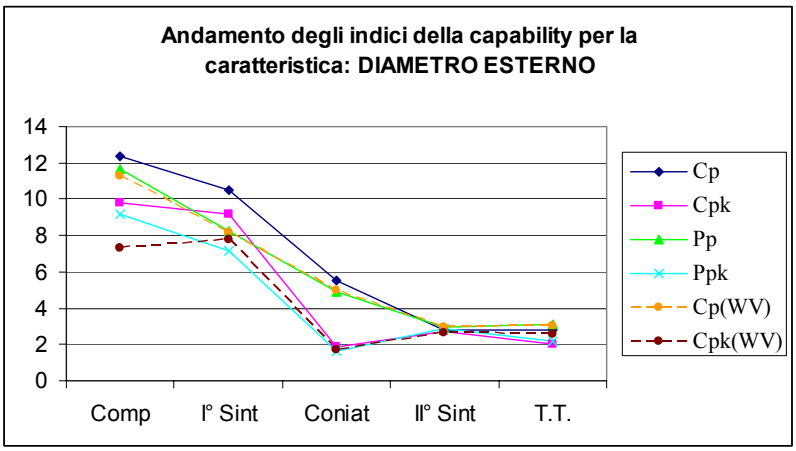


Figura 4.7: Andamento degli indici della capability per il diametro esterno.

Per quanto riguarda la stabilità, dal rapporto degli indici di capacità effettiva, il processo sembra essere molto stabile nel tempo.

Per tutti gli indici si nota un trend descrescente che porta comunque il processo ad avere nell'ultima fase una capacità molto elevata.

Questo sta ad indicare che il processo è ben centrato all'interno dei limiti di tolleranza ed ha una ridotta variabilità.

Il confronto tra le varie stime della deviazione standard del processo, evidenzia che anche in questo caso, essendo la distribuzione delle osservazioni asimmetrica, sono preferibili gli indici calcolati col metodo della varianza ponderata, che tra l'altro sono molto simili agli indici di capacità di lungo termine, calcolati violando il vincolo di normalità dei dati.

5. CONCLUSIONI

Il fine ultimo di questa relazione è quello di fare un'analisi della performance del processo produttivo di una corona conica sinterizzata, nelle principali fasi, (compattazione, prima sinterizzazione, coniatura, seconda sinterizzazione, trattamento termico), per tutte le sue variabili di interesse, (quota sfera, altezza totale, salto verticale, diametro interno misurato a tre altezze diverse, diametro esterno).

Per prima cosa, al termine di ogni fase, sono state rilevate le misure dai campioni estratti casualmente dall'intero lotto lavorato, (eccezion fatta per la prima fase dove, per alcune variabili, sono stati raccolti dei campioni sequenziali a intervalli regolari durante la fase produttiva).

Si ricorda poi, che per ogni fase il campione estratto non corrisponde allo stesso campione della fase precedente, ma ogni volta vengono utilizzati pezzi differenti.

L'analisi quindi è iniziata con un'esplorazione dei dati, per capire se esistono relazioni tra le variabili e tra le fasi, come si distribuiscono queste variabili e come eventualmente cambiano tra le varie fasi del processo.

Da questo primo studio, sono emerse delle importanti particolarità:

1. le osservazioni delle variabili quota sfera, altezza totale e salto, nella prima fase del processo, sono tra loro autocorrelate, essendo stato il campionamento di tipo sequenziale con un frequenza di campionamento abbastanza alta;
2. i dati, nella maggior parte dei casi, non si distribuiscono normalmente;
3. il cambiamento di fase provoca delle significative variazioni dimensionali delle varie caratteristiche del pezzo.

Mentre il terzo punto, appena esposto, non risulta un problema da risolvere in quanto non porta a delle complicazioni del problema iniziale, i primi due punti invece lo sono; infatti la violazione dell'indipendenza e della normalità delle osservazioni influenza l'interpretazione degli strumenti tradizionali per il controllo statistico della qualità dei processi produttivi.

Proprio procedendo con l'analisi vi è la verifica che il processo sia in controllo statistico; per far questo è stato necessario utilizzare delle opportune carte di controllo che tengano conto dell'autocorrelazione dei dati e della loro non normalità, queste sono per l'appunto le carte EWMA per dati autocorrelati.
Dalla verifica è emerso che il processo non sempre è in controllo statistico, per cui gli indici di capacità del processo sono stati influenzati da quest'ultima violazione.
Per ovviare al problema della violazione del vincolo di normalità delle osservazioni, sono stati utilizzati degli indici di capacità basati sul metodo a varianza ponderata per processi non-normali (Choobineh e Ballard, 1987, Bai e Choi, 1995).
Alla fine, comunque, per la variabile diametro esterno si osserva che il processo è ben centrato rispetto alle tolleranze, ha una variabilità contenuta e di conseguenza un'elevata capacità produttiva.
Per quanto riguarda invece le altre variabili, dall'analisi svolta si sono ottenuti degli indici abbastanza bassi, ovvero inferiori ad 1, che per la teoria sugli indici di capacità sta ad indicare che il processo presenta ampi margini di miglioramento.

A. APPENDICE

A.1 CARTE DI CONTROLLO

Di seguito, vengono riportate le carte di controllo di tipo Shewhart, utilizzate ed esposte nel terzo capitolo.

Nelle carte di controllo:

- alle linee continue rosse corrispondono i limiti di controllo calcolati;
- alla linea continua blu corrisponde la linea centrale;
- alle linee tratteggiate porpora corrispondono i limiti di tolleranza;
- alla linea spezzata nera corrisponde la statistica di controllo.

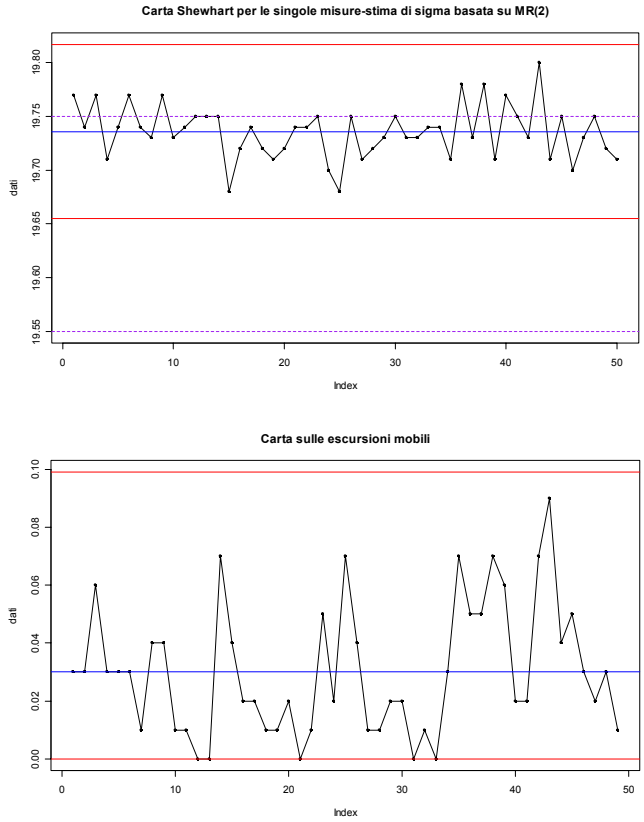


Figura A.1: Carta per mis. singole e carta delle esc. mobili relative alla quota sfera nella 2^ fase.

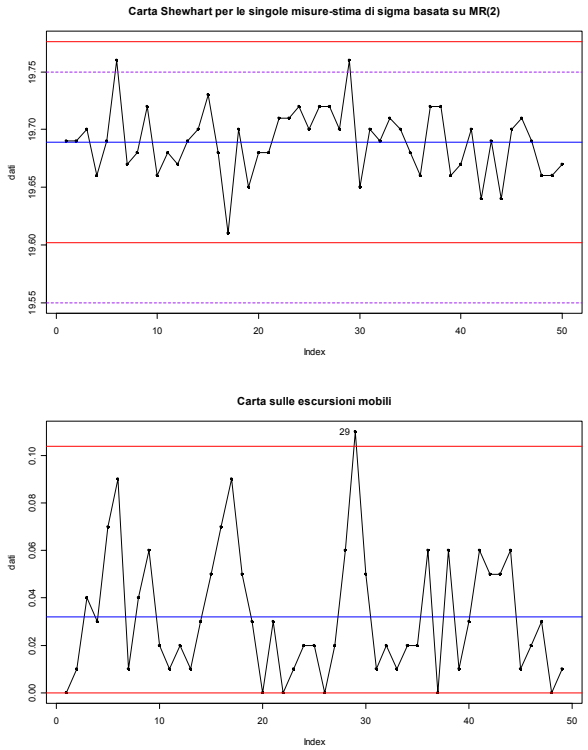


Figura A.2: Carta per mis. singole e carta delle esc. mobili relative alla quota sfera nella 3^ fase.

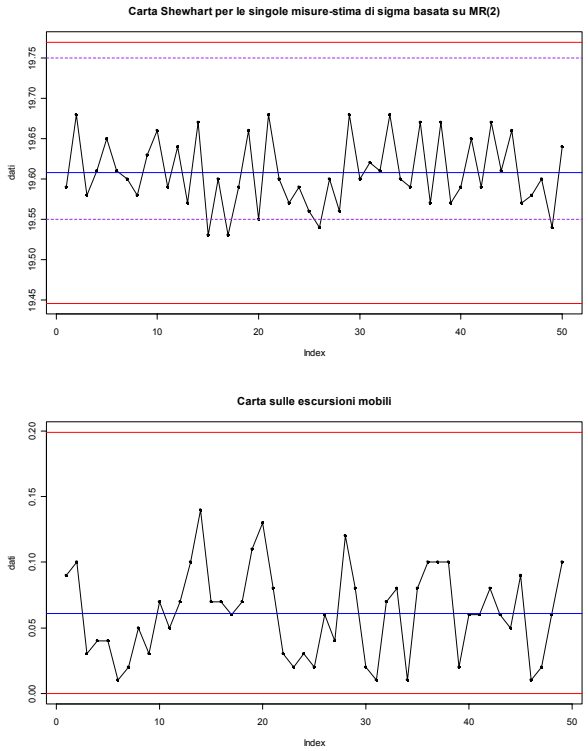


Figura A.3: Carta per mis. singole e carta delle esc. mobili relative alla quota sfera nella 4^ fase.

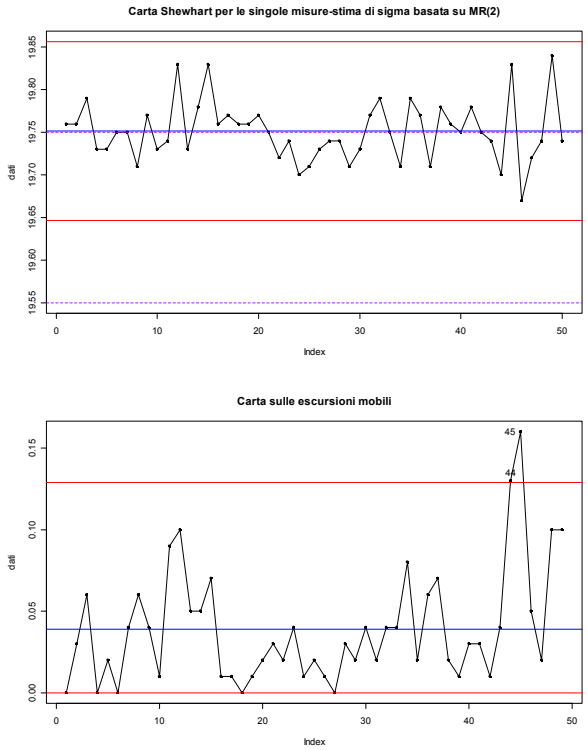


Figura A.4: Carta per mis. singole e delle esc. mobili relative alla quota sfera nella 5^ fase.

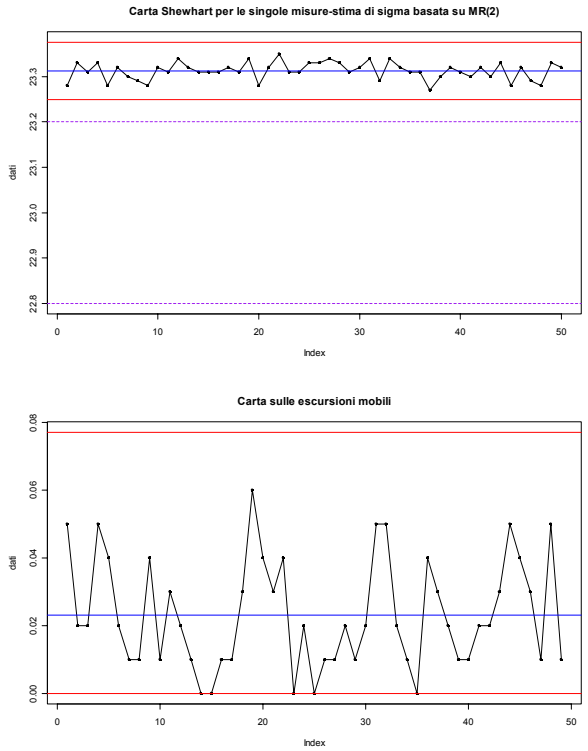


Figura A.5: Carta per mis. singole e delle esc. mobili relative all'altezza tot. nella 2^ fase.

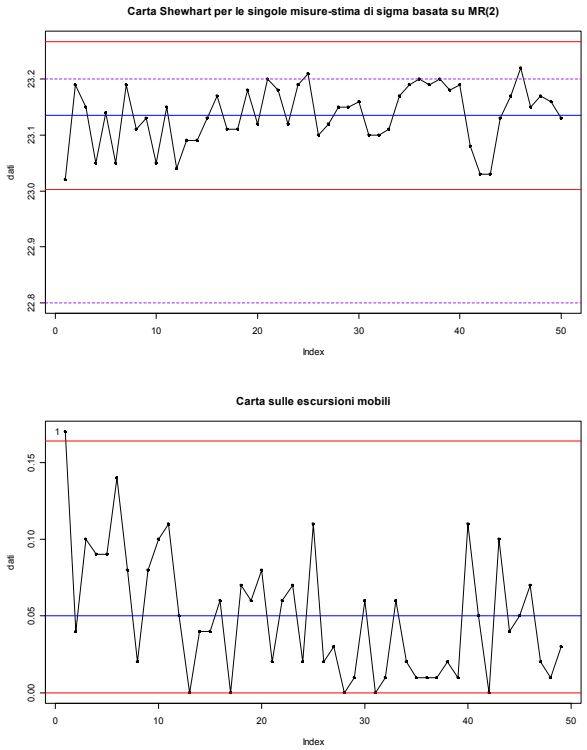


Figura A.6: Carta per mis. singole e delle esc. mobili relative all'altezza tot. nella 3^ fase.

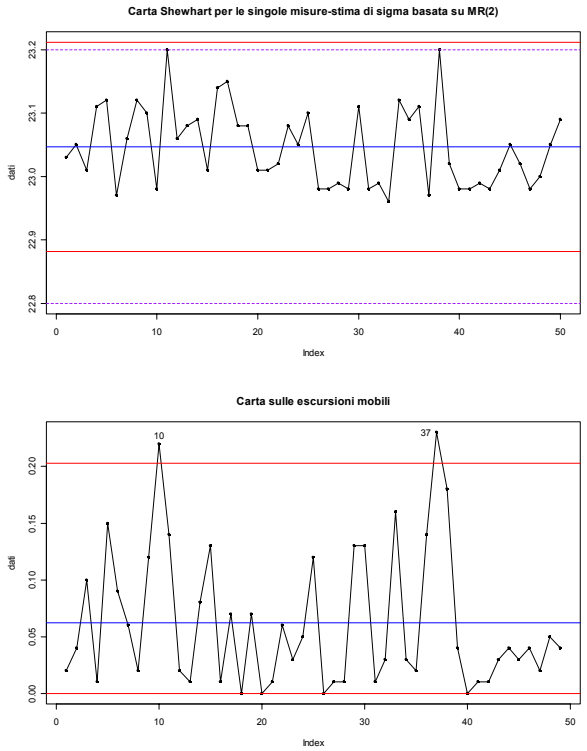


Figura A.7: Carta per mis. singole e delle esc. mobili relative all'altezza tot. nella 4^ fase.

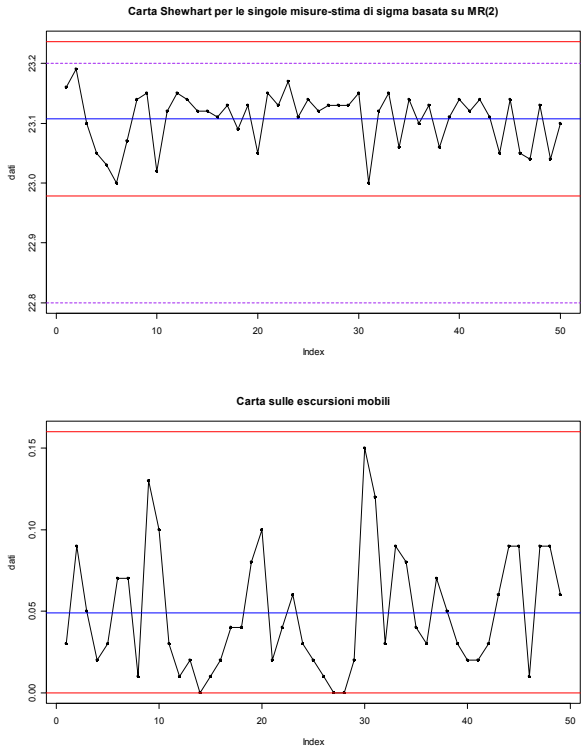


Figura A.8: Carta per mis. singole e delle esc. mobili relative all'altezza tot. nella 5^ fase.

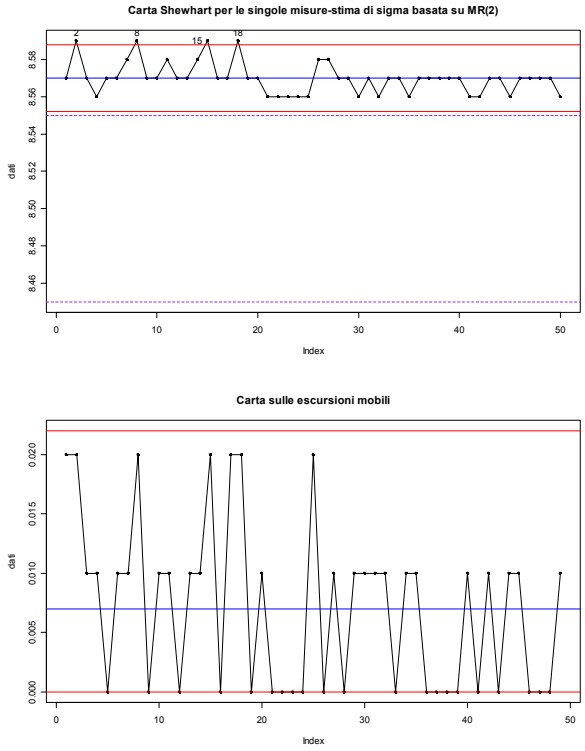


Figura A.9: Carta per mis. singole e delle esc. mobili relative al salto nella 2^ fase.

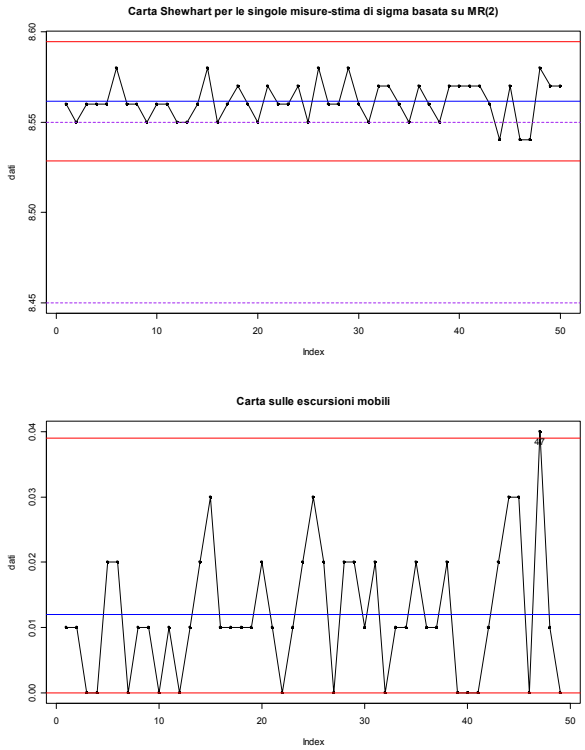


Figura A.10: Carta per mis. singole e delle esc. mobili relative al salto nella 3^ fase.

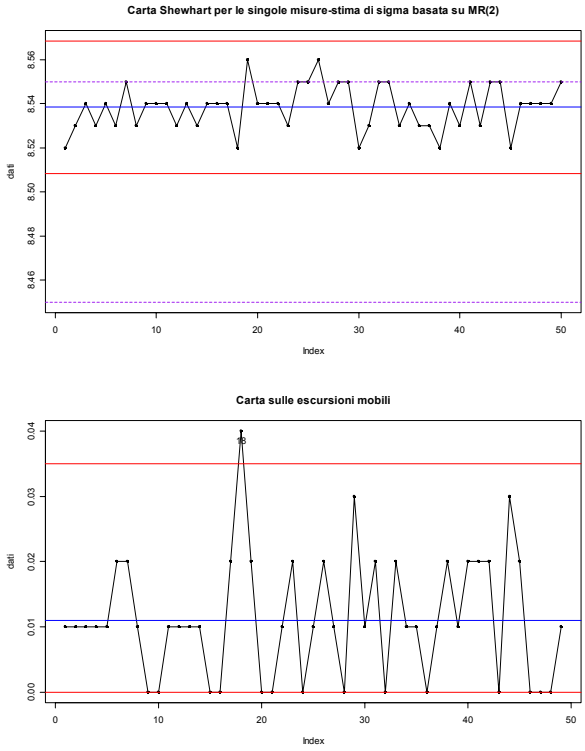


Figura A.11: Carta per mis. singole e delle esc. mobili relative al salto nella 4^ fase.

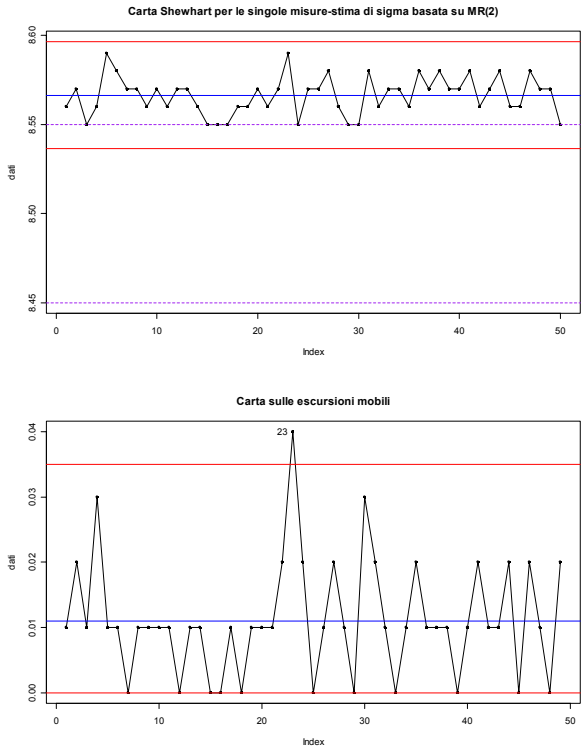


Figura A.12: Carta per mis. singole e delle esc. mobili relative al salto nella 5^ fase.

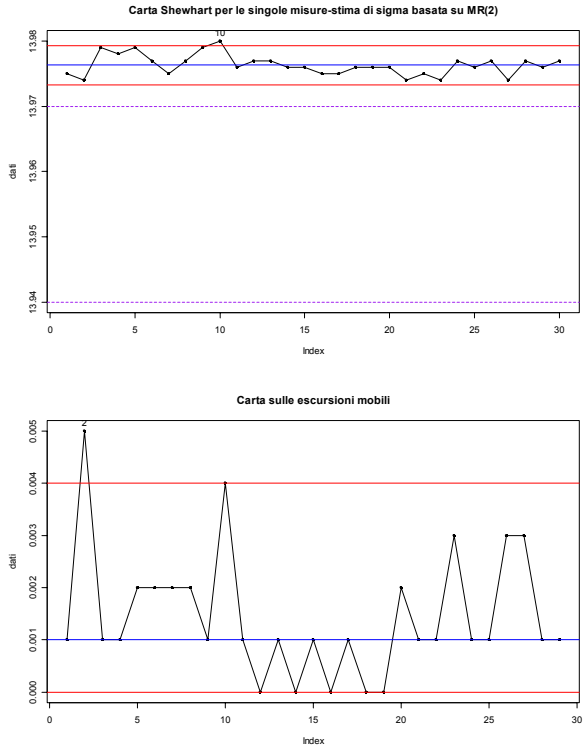


Figura A.13: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (mozzo) nella 1^ fase.

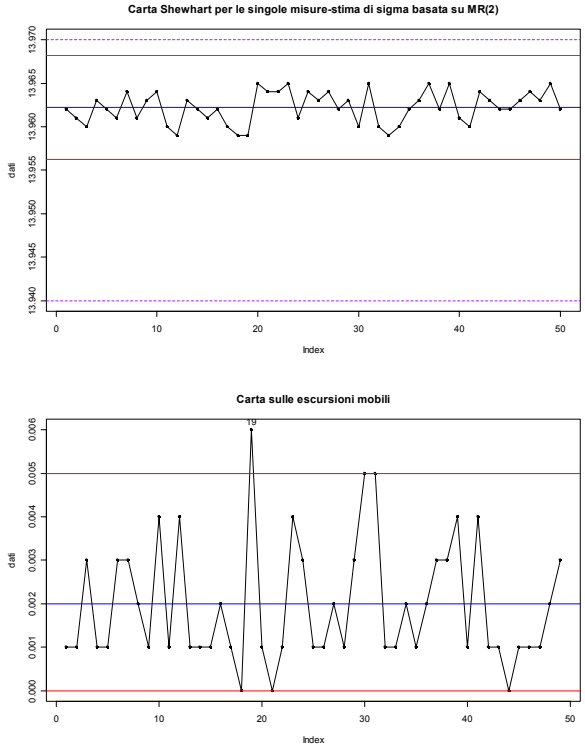


Figura A.14: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (mozzo) nella 2^ fase.

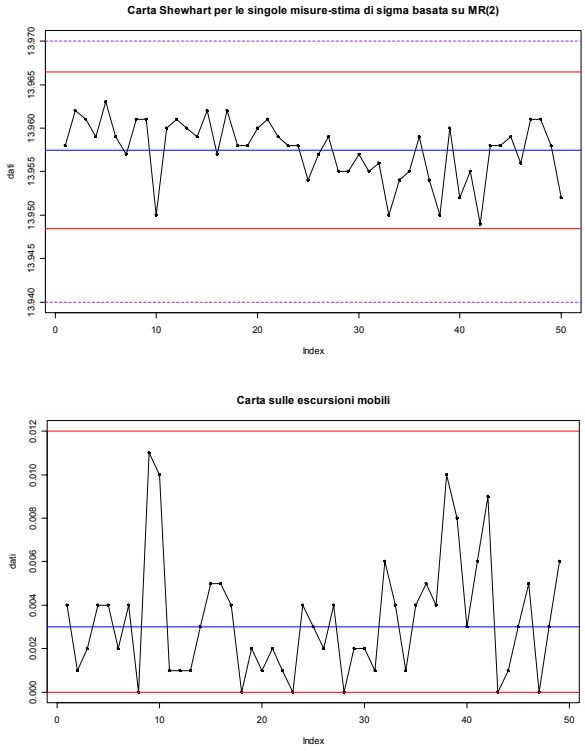


Figura 3.15: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (mozzo) nella 3^ fase.

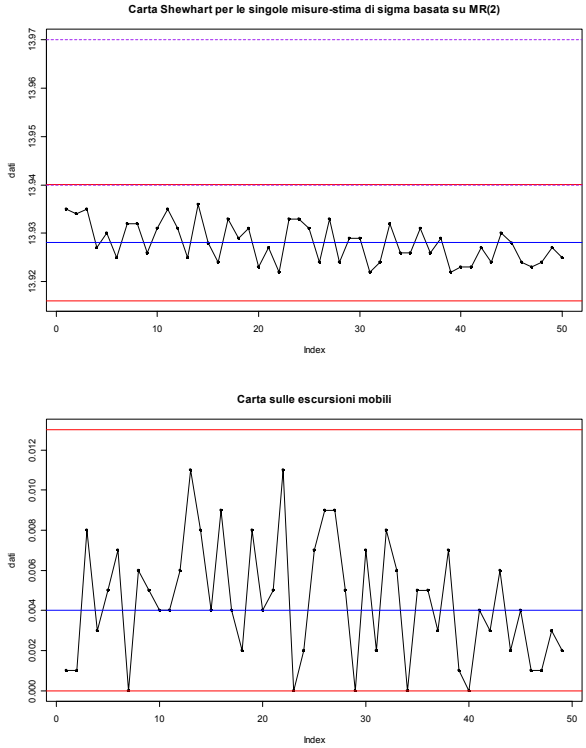


Figura A.16: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (mozzo) nella 4^ fase.

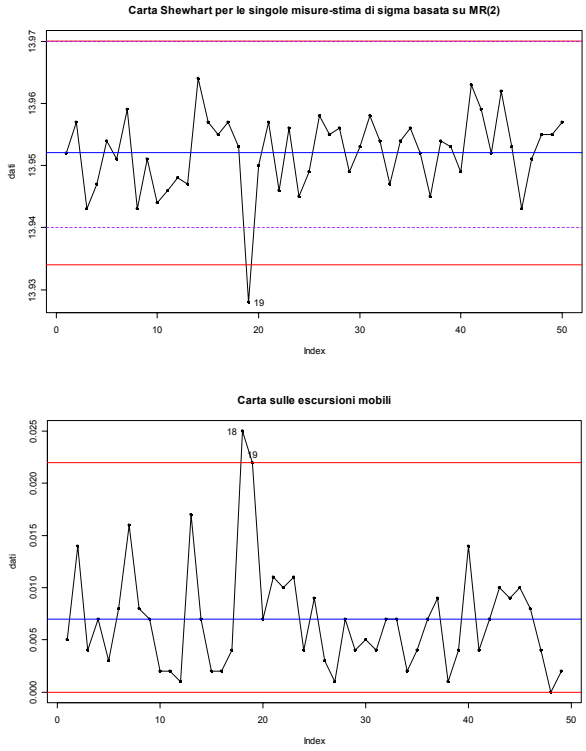


Figura A.17: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (mozzo) nella 5^ fase.

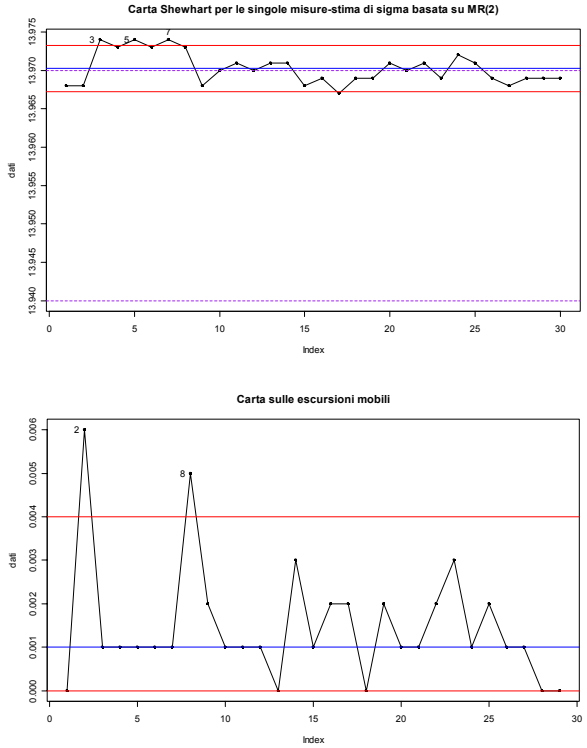


Figura A.18: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (1/2 foro) nella 1^ fase.

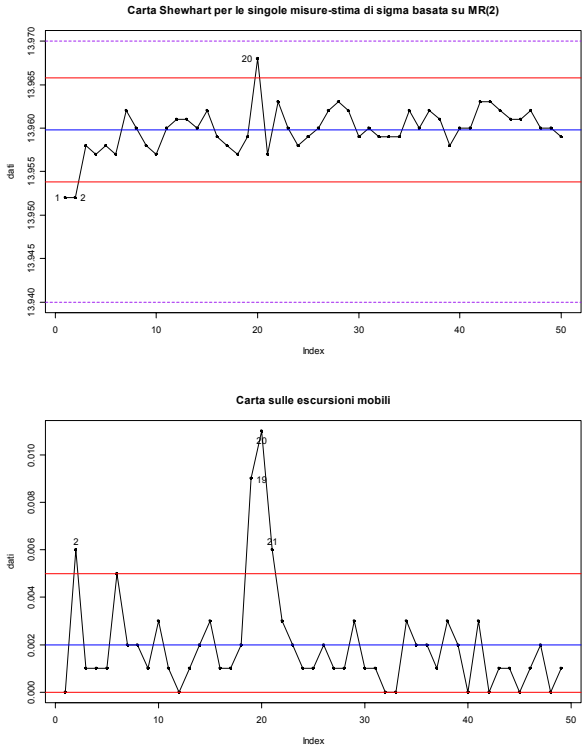


Figura A.19: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (1/2 foro) nella 2^ fase.

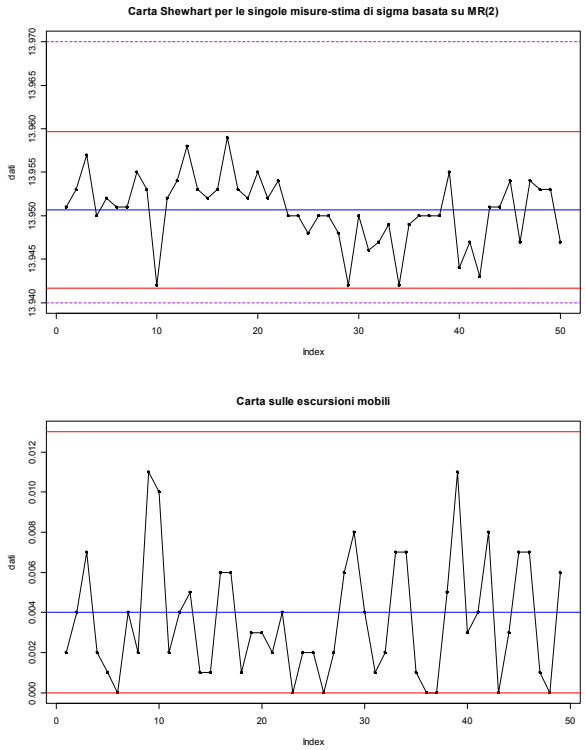


Figura A.20: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (1/2 foro) nella 3^ fase.

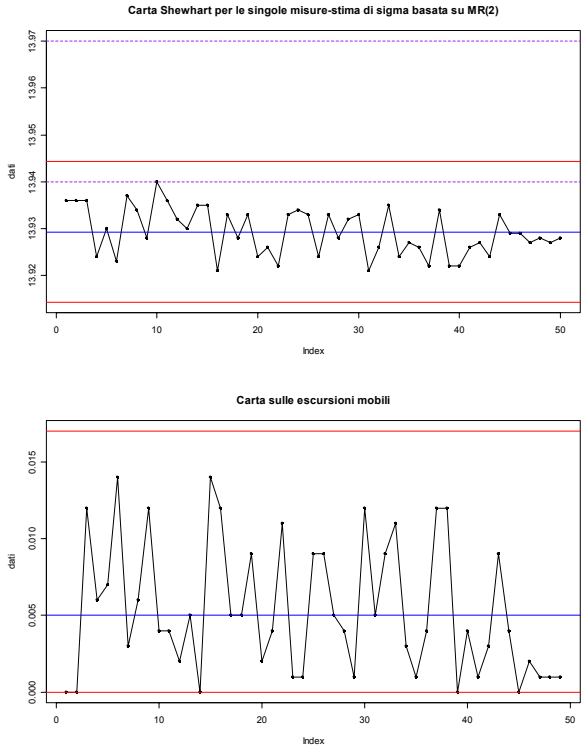


Figura A.21: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (1/2 foro) nella 4^ fase.

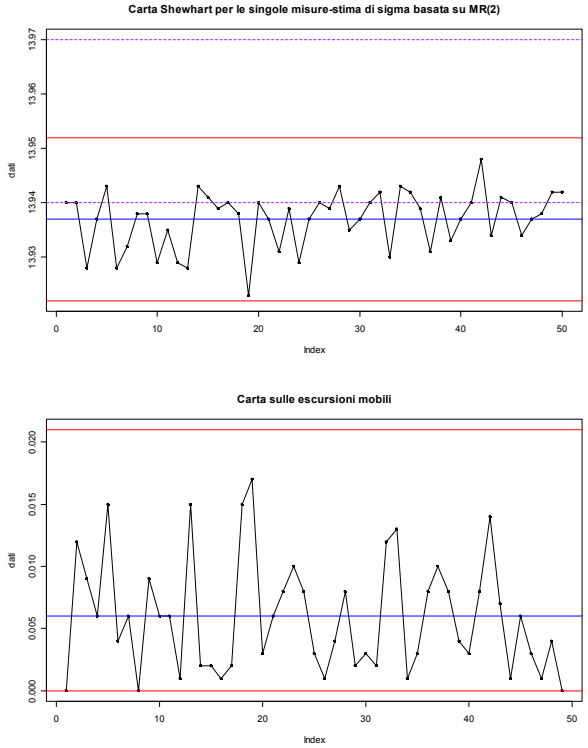


Figura A.22: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (1/2 foro) nella 5^ fase.

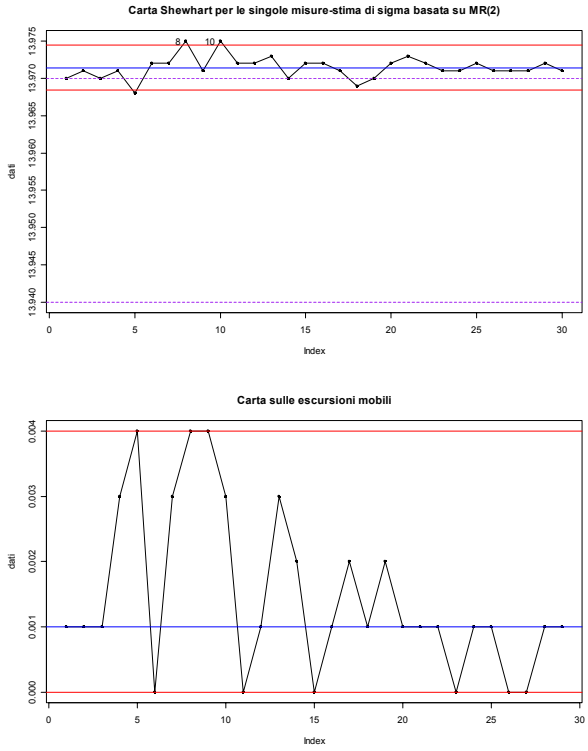


Figura A.23: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (dent.) nella 1^ fase.

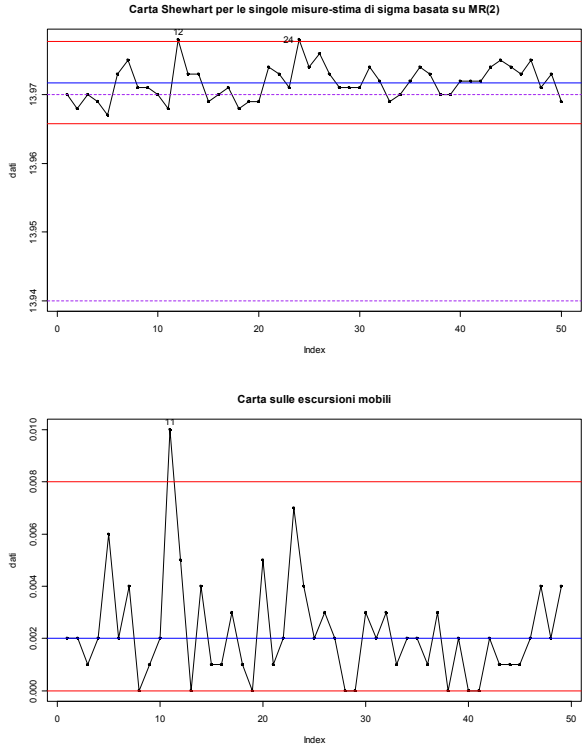


Figura A.24: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (dent.) nella 2^ fase.

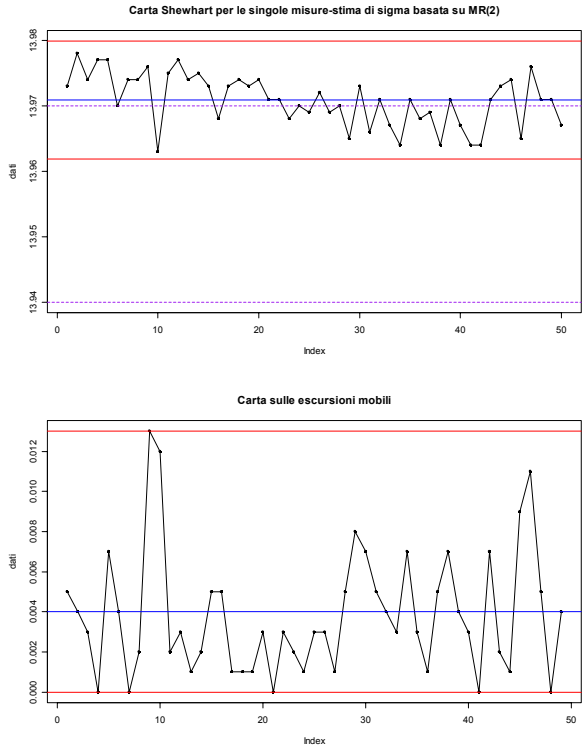


Figura A.25: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (dent.) nella 3^ fase.

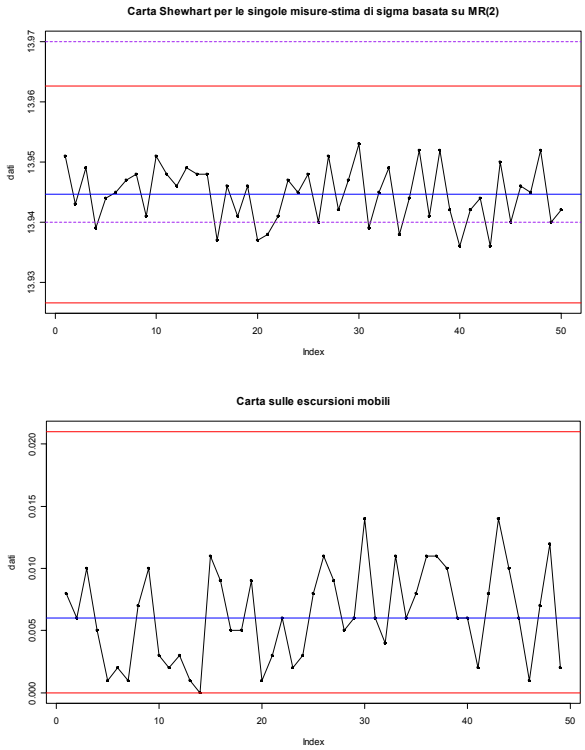


Figura A.26: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (dent.) nella 4^ fase.

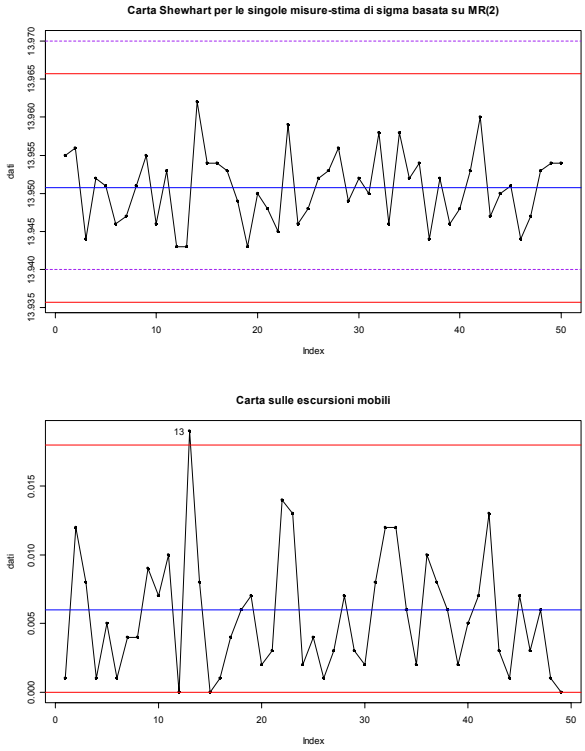


Figura A.27: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. int. (dent.) nella 5^ fase.

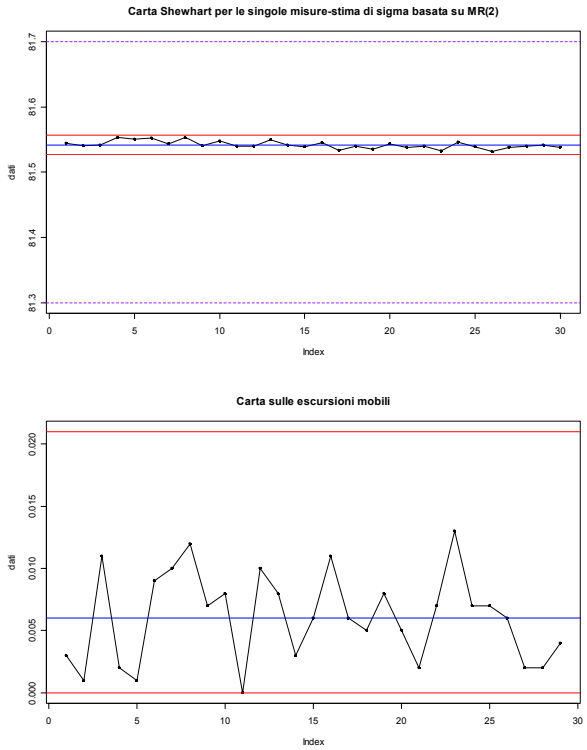


Figura A.28: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. esterno nella 1^ fase.

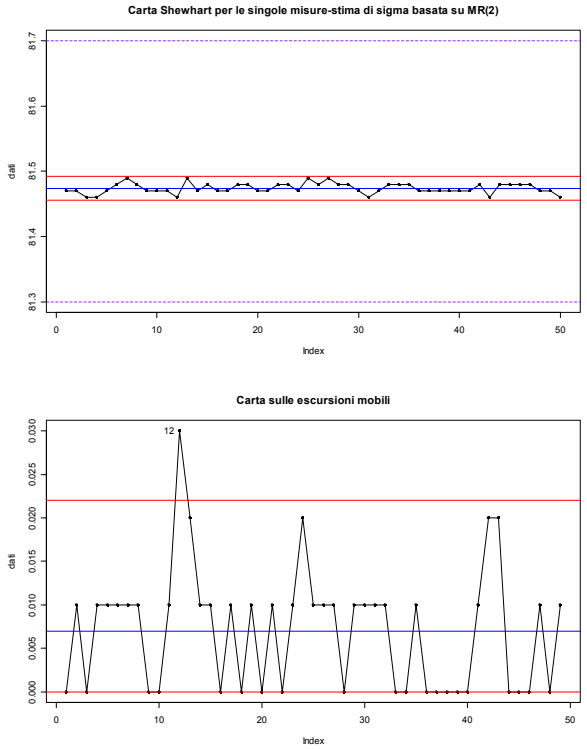


Figura A.29: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. esterno nella 2^ fase.

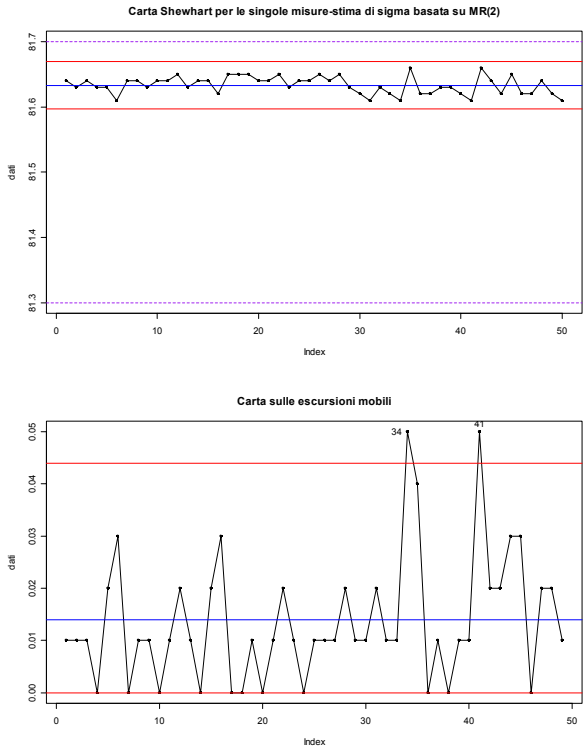


Figura A.30: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. esterno nella 3^ fase.

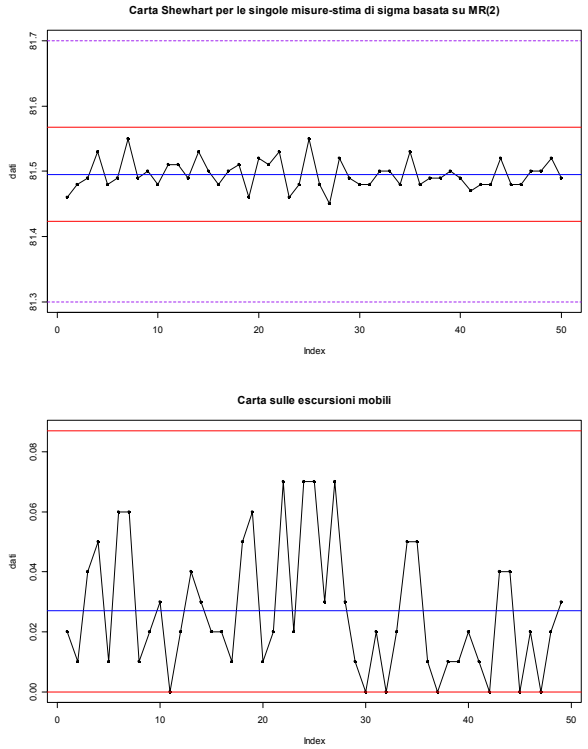


Figura A.31: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. esterno nella 4^ fase.

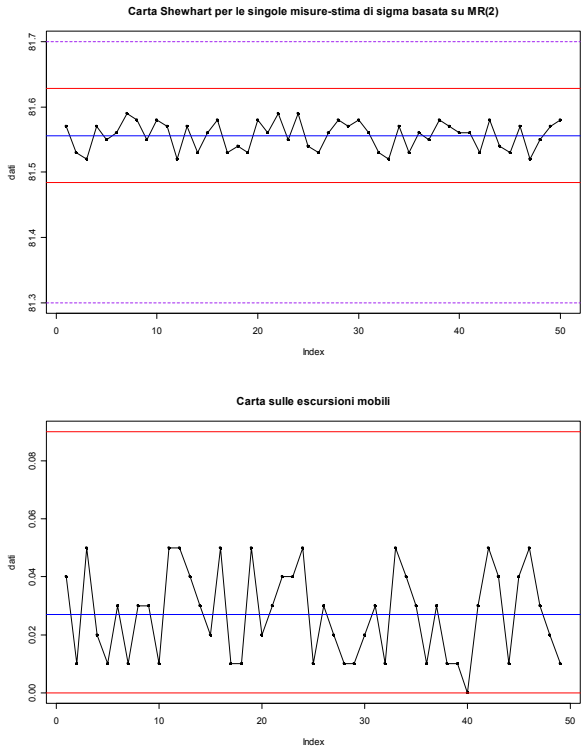


Figura A.32: Carta per mis. singole e delle esc. mobili per il diam. esterno nella 5^ fase.

BIBLIOGRAFIA

Bai D. S., Choi I. S. (1995), "*X-bar and R control charts for skewed populations*", Journal of Quality Technology **27**.

Bortot P., Ventura L., Salvan A. (2000), "*Inferenza statistica: Applicazioni con S-PLUS e R*", Cedam.

Choobineh F. e Ballard J. L. (1987), "*Control-limits of QC charts for skewed distributions using weighted-variance*", IEEE Transactions on Reliability **36**.

Iacus S. M., Masarotto G. (2003), "*Laboratorio di statistica con R*", McGraw-Hill.

Montgomery D. C. (2000), "*Controllo statistico della qualità*", McGraw-Hill,

Piccolo D. (1998), "*Statistica*", Il mulino.

Roberts, S. W. (1959), "*Control chart tests based on geometric moving averages*", Technometrics **1**.

Shewhart, W. A. (1931), "*Economic control of quality of manufactured product*", D. van Nostrand Company, Inc.

Wu H.-H., Swain J. J., Farrington P. A., Messimer S. L. (1999), "*A weighted variance capability index for general non-normal processes*", Quality and Reliability Engineering International **15**.

Sono stati utilizzati, poi i lucidi dei corsi:

- di "*Metodi statistici per il controllo della qualità*" dell'A. A. 2003-2004, tenuto dalla prof.ssa Capizzi Giovanna;
- di "*Analisi delle serie temporali*" dell'A. A. 2003-2004, tenuto dal prof. Masarotto Guido.

Per quanto riguarda le informazioni sul processo produttivo, sono stati utilizzati degli appunti personali della Dr.ssa Beggio Catia (responsabile controllo metallurgico e qualità sinterizzato presso mG miniGears S.p.a. di Padova), e la dispensa "*PM BASE, Manuale introduttivo alla Metallurgia delle Polveri*" di proprietà della mG miniGears S.p.a.

Per le informazioni introduttive sull'azienda mG miniGears S.p.a., fonte di ispirazione è stato il sito internet dell'azienda (*http://www.minigears.com*).