

# L'affidabilità nella carta di controllo

Stefano De Falco

Uno degli strumenti più validi per il monitoraggio delle caratteristiche di qualità dei componenti critici, sia in ambito industriale che in quello edile, è la carta di controllo. Essa, infatti, fornisce utilissime indicazioni su eventuali derive dei valori misurati da valori assunti come target. Nel presente lavoro si propone un modello innovativo di carta di controllo in cui tale "strumento" è reso molto più sensibile attraverso l'impiego congiunto nel modello della carta del parametro affidabilità. Il modello proposto è sviluppato e sono riportati dei risultati numerici relativi ad una simulazione condotta con dati reali, in collaborazione con un'azienda produttrice di materiali compositi.

Le carte di controllo tradizionali si basano sull'assunzione che i dati di misura, relativi alla media di ciascun sottogruppo dei parametri sotto osservazione di una caratteristica di qualità di un materiale, siano riportati a prescindere dalla stabilità nel tempo dei suoi parametri stessi. Nel caso particolare di monitoraggio della caratteristica di qualità di un materiale edile ad esempio, uno dei parametri che non risulta nella realtà godere della proprietà di stabilità è la sua affidabilità che decresce col tempo in virtù della degradazione a cui il prodotto è soggetto.

L'approccio tradizionale prevede la costruzione di carte di controllo caratterizzate da limiti stazionari, ignorando la possibilità di un "aggiustamento" dei suddetti limiti. Tale innovazione concettuale determina la possibilità di avere uno strumento in grado di effettuare un controllo del tipo "ad inseguimento di traiettoria", modulato sulle possibili variazioni del misurando. Queste variazioni possono ad esempio avvenire per effetto di degradazione delle caratteristiche in osservazione. La modellistica per lo scenario descritto è basata proprio sull'implementazione della funzione di affidabilità come sorgente nota, in quanto predeterminabile attraverso le curve di vita di un materiale analizzato, della variabilità dei limiti di controllo.

I risultati conseguibili attraverso l'approccio proposto consentono di migliorare la "sensibilità" dello strumento di monitoraggio attraverso la modulazione dei limiti di controllo, che in tal modo acquisisce un benefico potere discriminatorio in grado di separare gli effetti di variabilità aleatoria che traggono origine dalle cause comuni da quelli di variabilità deterministica legati a variazioni prevedibili del misurando.

## La qualità nei materiali

La qualità nei materiali viene espressa con caratteristiche verificabili con tecniche deterministiche e tecniche probabilistiche.

S. De Falco, Responsabile Ufficio Ricerca e Trasferimento Tecnologico, Polo delle Scienze e Tecnologie dell'Università degli Studi di Napoli Federico II; Responsabile Ufficio Servizi AICQ Meridionale

*Caratteristiche deterministiche:* rappresentate da prestazioni di base o di specifica, la misurazione avviene di norma mediante il collaudo di accettazione tramite la verifica del loro grado di conformità.

*Caratteristiche probabilistiche:* rappresentate da prestazioni attese nel tempo del componente/sistema, la misurazione avviene mediante l'utilizzo di metodologie probabilistiche di parametri: affidabilità; disponibilità; manutenzione; sicurezza. Tali metodologie vengono utilizzate per garantire la tenuta dei sistemi/prodotti nell'arco del tempo ed a prevenire i rischi associati ad essi, nei quali possono essere coinvolti sia fattori umani che fattori ambientali di degradazione.

Le carte di controllo sono utilizzate per controllare la variabilità di un sistema. È necessario infatti mantenerla sotto controllo in modo da ottenere livelli di qualità accettabili.

La variabilità di un sistema è influenzata da due diversi tipi di cause: le cause comuni, le cause speciali.

Si ricordi che per sistema si intende un insieme di parti legate tra loro da rapporti di interdipendenza. Un edificio, un impianto, un processo produttivo, una macchina, possono essere tutti considerati sistemi.

In ogni sistema è presente una variabilità intrinseca che non dipende da cause esterne detta variabilità naturale; se non intervengono cause esterne, il grafico che rappresenta questa situazione ha una forma a campana.

La variabilità che dipende dal sistema è originata da tutta una serie di cause legate fra loro chiamate cause comuni.

La variabilità dipendente da queste cause è prevedibile: la curva a campana che rappresenta la variabilità standard è contenuta in limiti ben precisi.

Nella distribuzione normale si verifica che:

- il 68,27% dei risultati di una misura è compreso nell'intervallo  $M \pm \sigma$ ;
- il 95,45% dei risultati di una misura è compreso nell'intervallo  $M \pm 2\sigma$ ;
- il 99,73% dei risultati di una misura è compreso nell'intervallo  $M \pm 3\sigma$ ;

Per calcolare i limiti di variabilità è necessario calcolare la  $\sigma$ ,

detta deviazione standard o scarto quadratico medio:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

In base alle considerazioni fatte emerge un punto chiave: qualsiasi sistema, se considerato isolato da qualunque influenza esterna, presenta una sua variabilità naturale e che è adeguatamente prevedibile.

Un sistema in queste condizioni si dice che è in stato di controllo.

In questa situazione il sistema è influenzato da una serie di *cause comuni*:

- le cause comuni dipendono da come il sistema è stato progettato e costruito, sono quindi una caratteristica intrinseca del sistema;
- in presenza delle sole cause comuni l'ampiezza della dispersione dei dati è prevedibile e costante e in questo intervallo la variabilità è casuale;
- se su un sistema agiscono solo cause comuni non ha senso intervenire su un aspetto specifico del sistema, se la variabilità è troppo grande si può ridurla soltanto modificando il sistema.

Le cause al di fuori del sistema possono di per sé creare una variabilità, queste cause vengono chiamate *cause speciali*. Esse alterano la variabilità naturale e generano una variabilità non prevedibile che disturba il funzionamento del processo.

A differenza delle cause comuni è possibile intervenire direttamente sulle cause speciali in quanto esse sono al di fuori del funzionamento naturale del sistema; in questa situazione si deve intervenire su un aspetto specifico del sistema per eliminare la causa quindi la variazione che ha generato.

La Carta di Controllo è uno strumento statistico che permette di accorgersi se un sistema è fuori controllo. La forma più comune della carta di controllo registra in ordine cronologico e graficamente i valori di un parametro di un prodotto o di un processo, con il riferimento a dei limiti che tengono presente la variabilità naturale del processo in esame.

Esistono due tipi fondamentali di carte di controllo: *per variabili* vengono impiegate nei casi in cui si vuole tenere sotto controllo una caratteristica misurabile (una dimensione, un peso, una resistenza a sforzo); *per attributi* si usano nel caso in cui la caratteristica debba essere giudicata in termini di "va bene" o "non va bene".

Il tipo più comune di carta di controllo per variabili è la *Carta X-R*.

I valori fondamentali della Carta di Controllo X-R sono: la *media del parametro x*, ricavata da misure eseguite su provini appartenenti a campioni prelevati da un processo produttivo; il *Range (R)*, lo scarto tra il valore minimo e il valore massimo; i *limiti superiore ed inferiore* entro i quali il processo si mantiene se rispetta la sua variabilità naturale.

Ogni punto della carta di controllo rispecchia il valore medio di più valori di uno stesso parametro.

Quando un punto si posiziona fuori dei limiti è probabile che il

processo non sia più sotto controllo.

Lo stato di fuori controllo si può verificare anche se i punti non restano fuori dei limiti ma vi sono particolari configurazioni dei punti dentro ai limiti di controllo.

Le carte X-R si presentano come due diagrammi distinti, che hanno in comune la scala delle ascisse, graduata secondo la cadenza delle rilevazioni, e riportano in ordinata i dati sovraindicati, ricavati da misure effettuate sui campioni dei sottogruppi.

Si riportano poi alcune linee orizzontali, in corrispondenza dei valori caratteristici.

Per la carta X si tracciano:

- una linea continua in corrispondenza del valore medio  $\bar{x}$ , calcolato come media dei valori  $x_i$  misurati, relativi ai vari sottogruppi considerati, o del valore medio atteso,  $x_a$ ;
- due linee a tratti per l'analisi di processo, denominate Limite Superiore di Controllo (LSC) e Limite Inferiore di Controllo (LIC);
- due linee a punti che individuano i valori di avvertimento che prefigurano l'approssimarsi di situazioni di fuori controllo.

Per la carta R si tracciano:

- una linea continua in corrispondenza del valore R, media dei valori dello scarto R di tutti i sottogruppi considerati;
- una linea a tratti in corrispondenza del Limite Superiore di Controllo.

I valori limite superiore e inferiore di controllo sono spesso indicati mediante gli acronimi UCL (Upper Control Limit) e LCL (Lower Control Limit). La loro distanza dalla linea media viene stabilita in relazione alla dispersione ammissibile per il processo.

In una distribuzione normale la probabilità che un qualsiasi valore del parametro in osservazione sia compreso nell'area sottesa alla curva, tra le ascisse  $x-3\sigma$  e  $x+3\sigma$  è pari al 99,73% (dove  $x$  è il valore medio).

Nella pratica corrente, i valori limite di controllo rispetto alla media sono appunto posti pari a  $x_a+3\sigma$  (LSC) e  $x_a-3\sigma$  (LIC).

Occorre notare che la linea del valore medio da riportare in diagramma può essere, secondo l'utilizzo previsto per la carta, quella corrispondente alla media dei valori  $x_i$  rilevati sperimentalmente, o quella del valore di specifica atteso,  $x_a$ .

Nel primo caso, obiettivo della carta è quello di esaminare statisticamente il processo, per vedere se in esso agiscono solo cause comuni, quale sia la dispersione dei risultati e controllare che non intervengano variazioni. Quando l'obiettivo è quello di assicurarsi che i prodotti rispecchino le specifiche di progetto, va riportato  $x_a$  ed il valore LSC - LIC corrispondente allo scarto ammesso.

Le linee di controllo sono utili per individuare immediatamente la situazione di fuori controllo del processo e la necessità di intervenire con interventi correttivi sullo stesso e di scartare i prodotti fuori specifica: sono pertanto linee d'azione.

Le linee di avvertimento, spesso anche rappresentate sui diagrammi, sono viceversa utilizzate per evidenziare l'approssimarsi di situazioni di rischio di fuori controllo, vengono in genere fissate ad una distanza pari a  $+2\sigma$  e  $-2\sigma$  dalla linea centrale.

Quando i dati calcolati da un sottogruppo giacciono tra la linea di avvertimento e quella di controllo adiacente, è buona norma

osservare il processo per comprendere se sia intervenuta una causa speciale o se sia in atto un processo di alterazione significativo di uno dei parametri d'influenza.

La carta R, da utilizzare in accoppiamento con la carta X, può anch'essa essere corredata dall'indicazione del valore dello scarto valutato come media delle misure effettuate sui sottogruppi, o da quello di specifica. In questa carta, ovviamente, si indica solo il limite di controllo superiore. L'osservazione della carta R è soprattutto utile per controllare l'entità della dispersione nel processo.

Le carte di controllo tradizionali, come precedentemente introdotto, sono caratterizzate da limiti di controllo stazionari, fissati a  $\pm 3\sigma$ , rispetto alla media del parametro sotto osservazione considerato. Si fa riferimento in questo caso ad un sistema di assi cartesiani, con in ascissa il numero dei sottogruppi prelevati ed in ordinata i valori del parametro sotto osservazione, con particolare attenzione alla media degli stessi sottogruppi. Si costruisce la carta di controllo con le regole note. La tipica carta di controllo, dunque, si presenterà come nella figura 1.

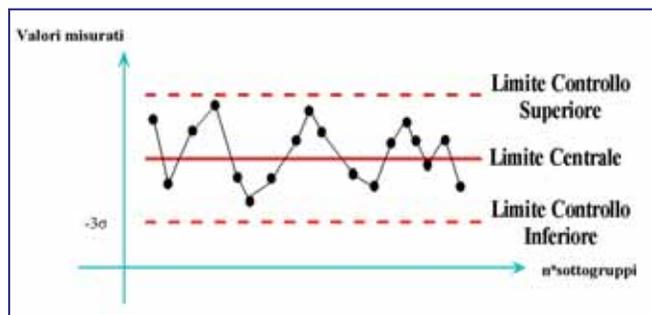


Figura 1 - Carta di controllo per variabili

Al fine di "trasformare" la carta di controllo tradizionale in una "carta affidabilistica" che sia tempo-variante, è necessario, quale primo passo, rendere l'asse delle ascisse (della figura 2) legato al tempo. A tal fine si è sostituito ai valori ascissa "n. sottogruppo" il loro tempo di prelievo.

La tipica carta di controllo, così, si presenterà avendo ancora i limiti stazionari, ma avendo "graficato" i valori di misura leggendoli in ascissa rispetto al loro tempo di acquisizione. Ossia si è assegnata la proprietà di tempo-varianza della carta.

### Carta affidabilistica

Ai fini della costruzione della carta affidabilistica proposta, valutata mediante il tasso di guasto relativo al particolare prodotto (o componente/sistema) e alla specifica caratteristica di qualità che si vuole monitorare, vanno osservate almeno in prima approssimazione le seguenti ipotesi: *varianza  $\sigma$  costante* - la caratteristica

in esame non subisce una variazione della varianza nel tempo; *tasso di guasto  $\lambda$  approssimativamente costante* - dato il tasso di guasto, sarà nota la *funzione di affidabilità  $R(t)$* , che decresce esponenzialmente con il tempo.

Nella figura 2 è riportato l'andamento della funzione affidabilità.

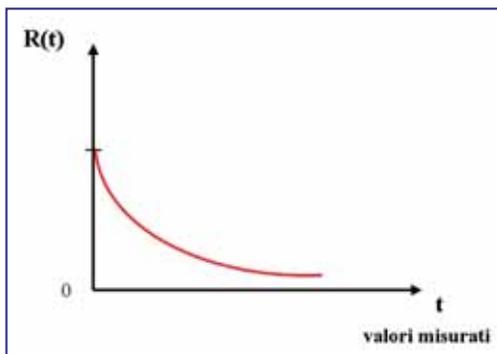


Figura 2 - Funzione Affidabilità (Reliability)

Lo scopo della carta di controllo proposta sarà dunque il monitoraggio del funzionamento del prodotto (o componente/sistema) mediante l'osservazione della sua caratteristica di qualità.

La modellistica per lo scenario descritto è basata sull'implementazione della funzione di affidabilità come sorgente nota, in quanto predeterminabile attraverso le curve di vita di un prodotto analizzato, della variabilità dei limiti di controllo.

Sulla base delle ipotesi prese in considerazione la carta di controllo si modifica presentando limiti variabili, non più del tipo  $\pm 3\sigma$  (stazionari), ma del tipo  $\pm (3K\sigma + k'\sigma)$ , dove il coefficiente  $k$  dipende dal tempo attraverso la funzione affidabilità e vale  $k=f[R(t)]$  ed il coefficiente  $k'$  è da considerarsi un parametro di progetto e rappresenta l'incremento di tolleranza che si vuole assegnare al monitoraggio considerando che in fase iniziale il valore di affidabilità è massimo e pertanto la probabilità di una non conformità è, in media, bassa.

Si è assunto infatti nella modellazione del sistema un incremento della tolleranza pari a  $3\sigma$  dell'ulteriore quantità  $k'\sigma$ , che rappresenta la maggior quota da cui iniziare a far degradare esponenzialmente i limiti di controllo.

In particolare, per un tasso di guasto  $\lambda$  costante risulta:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda t}$$

- In  $t=0$ , l'affidabilità è massima. Pertanto il vincolo di una tolleranza a  $3\sigma$  può comportare in relazione alla bassa probabilità di avere un fuori controllo, un costo elevato di gestione del sistema (dato dal costo del controllo più il costo dell'intervento di ripristino del sistema). Quindi è più opportuno, nell'ottica della minimizzazione del rapporto costi/benefici (rapporto obiettivo), rischiare in questa fase di avere un fuori controllo, avendo però un costo di gestione del sistema meno elevato.
- Negli istanti di tempo successivi, viceversa, sempre nell'ottica della minimizzazione del rapporto obiettivo, risulta più conveniente, in virtù dell'aumento della probabilità di riscontrare un fuori controllo, adottare un controllo più selettivo che faccia decadere il termine di  $3\sigma$  come  $e^{-\lambda t}$ .

Considerando il valore incrementale  $k'\sigma$ , resterà individuato, in funzione del tasso di guasto del sistema in osservazione e della  $\sigma$  dei dati misurati, un punto d'intersezione al di là del quale il controllo risulterà più selettivo del limite stazionario  $3\sigma$ .

Con le medesime regole caratteristiche di una carta di controllo

tradizionale, ma tenendo conto delle ipotesi fatte precedentemente e dei nuovi limiti di controllo, variabili, si potrà costruire la carta affidabilistica.

Qualitativamente essa si presenterà come nella figura 3.

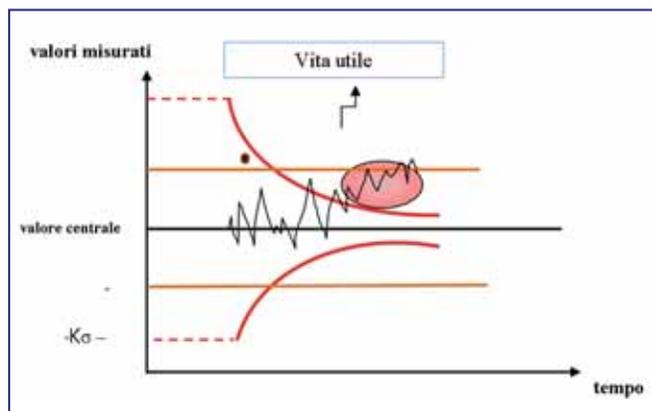


Figura 3 - Carta di controllo affidabilistica a limiti variabili

L'area evidenziata nella figura mostra una situazione di fuori controllo rilevata dalla carta di controllo affidabilistica, non da quella tradizionale. Nota la funzione di affidabilità, quindi, si rende il controllo più severo (limiti di controllo meno ampi) laddove ci si aspetta una diminuzione delle prestazioni del prodotto (o sistema) monitorato.

Potremmo tuttavia rilevare nel tratto iniziale una situazione di fuori controllo per la carta tradizionale, considerata invece in controllo dalla carta affidabilistica.

Essa infatti è caratterizzata inizialmente da limiti più blandi, in un'ottica di costi/benefici.

In fase iniziale la bassa probabilità di avere un fuori controllo non giustifica azioni correttive di intervento migliorativo.

In fase finale l'alta probabilità giustifica un sistema più selettivo di controllo.

Rendere il controllo più severo implica infatti un aumento di costi che evitiamo di sostenere inizialmente, perché risulta opportuno far dipendere il nostro controllo dalla funzione di affidabilità, secondo cui il prodotto, durante la sua vita utile, funziona riducendo le sue prestazioni solo nel tempo.

Nella realtà le misure rilevate sono affette nel tempo a degradazione. Si registra infatti un aumento della varianza,  $\sigma$  (causato dal misurando e dal sistema di misura), relativa ai diversi sottogruppi esaminati progressivamente, come visibile nella figura 4. È possibile approssimare l'andamento della varianza nel tempo attraverso una legge lineare del tipo:  $\sigma = a_1 + a_2t$

In questo caso la carta affidabilistica presenterà limiti di controllo risultanti dall'involuppo di curve parametriche in  $\sigma$  crescente (data la relazione lineare), cioè di intensità maggiore via via nel tempo, come mostrato nella figura 5.

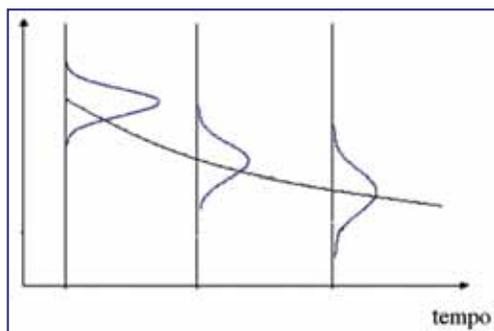


Figura 4 - Andamento nel tempo dei dati misurati

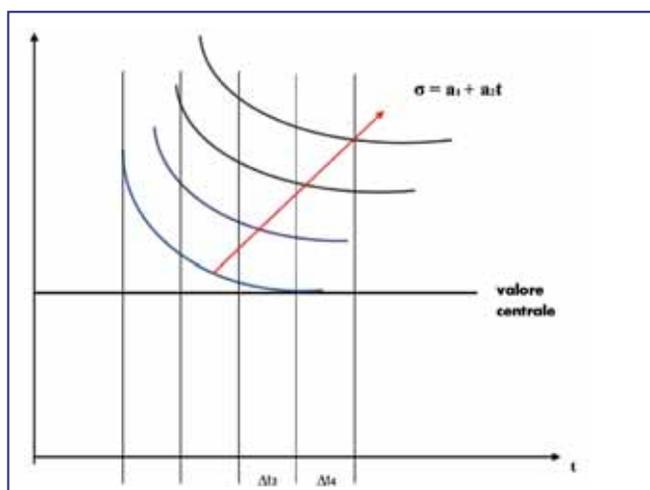


Figura 5 - Caso relativo alla varianza non costante

Si rimuove dunque l'ipotesi precedentemente fatta di varianza costante nel tempo (che può ritenersi valida approssimativamente solo per i primi intervalli di tempo impiegati per il prelievo delle misure dei vari sottogruppi, per i quali la varianza, appunto, non presenta rilevanti differenze).

Nella figura 6 si fa riferimento alla vita utile del prodotto (o componente/sistema) in esame, monitorato mediante la sua caratteristica di qualità.

Nel diagramma si riporta l'andamento del limite di controllo superiore, variabile per l'aumento di  $\sigma$  nel tempo.

Si supponga di prelevare ad esempio  $n$  elementi che costituiscono i sottogruppi in ognuno dei quattro intervalli di tempo considerati.

In generale si può dire che per ciascun intervallo di tempo  $\Delta t_i$  ( $i=1, \dots, 4$ ), si ha un valore crescente di  $\sigma_i$  ( $i=1, \dots, 4$ ). Questo accade perché la varianza dei parametri sotto osservazione nei sottogruppi subisce una degradazione tra un intervallo di tempo e quello successivo.

Si ottiene così un fascio di curve limiti parametriche in  $\sigma$ , parallele e traslate secondo la relazione lineare  $\sigma = a_1 + a_2t$ , tale che il limite di controllo sarà del tipo  $+(3K\sigma_i + K'\sigma_i)$ .

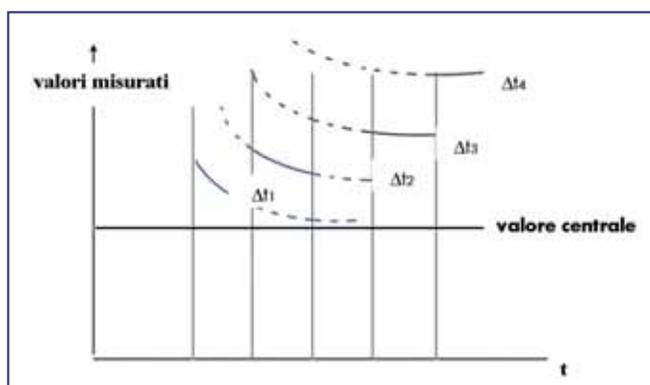


Figura 6 - Involuppo del limite di controllo superiore

La linea limite da considerare è l'unione dei vari rami del fascio, presi attraverso la conoscenza della variazione  $\sigma(t)$ .

Si può iterare il discorso fin qui fatto anche al limite di controllo inferiore della carta affidabilistica, ovviamente.

## Analisi dei Risultati

Attraverso i dati resi disponibili dal Settore Controllo Qualità dell'azienda Euroresina Italia, si è condotta una simulazione della implementazione della carta di controllo affidabilistica proposta.

Una delle esigenze riscontrabili in aziende produttrici di manufatti in materiali compositi per applicazioni edili è strettamente legata al soddisfacimento delle specifiche tecniche di resistenza fisica e/o chimica, in funzione dell'utilizzo cui il particolare prodotto industriale è destinato.

Risulta evidente che, data la profonda diversità tra i vari prodotti realizzati, ogni singola commessa richiede un'attenta analisi circa la scelta del tipo di resina da utilizzare, della stratificazione più appropriata dei laminati in materiali compositi e non in ultimo dagli standard qualitativi di volta in volta richiesti dal committente.

L'uso della carta di controllo affidabilistica interviene nel momento in cui il componente adempie alla funzione cui è preposto. Nel caso esaminato, la missione del profilato in materiale composito utilizzato in costruzioni edili, è quella di resistere a sollecitazioni meccaniche ed alle forze di carico cui è soggetto, mantenendo un valore di durezza superficiale che gli consenta di funzionare correttamente, evitando rotture e deformazioni.

In tale contesto la prova di durezza Barcol rappresenta una delle prove di laboratorio di notevole interesse per valutare le qualità fisiche del prodotto finito: essa permette di indicare la resistenza alla penetrazione di una punta acuminata in acciaio sotto l'azione di un carico a molla.

Per procedere con la misurazione del parametro di durezza si è ricorso all'utilizzo di uno strumento per la misura della durezza Barcol.

I dati dello strumento utilizzato sono: modello Durometro Barcol HR 1501; dimensioni 23x13x10 cm; peso netto 0,9 kg.

Dai limiti di specifica imposti si è verificato una conformità dei dati disponibili relativi ai lotti di componenti esaminati in un range compreso tra 80 e 90 Barcol.

Il controllo della caratteristica durezza superficiale per il profilato in materiale composito, del quale si valuta il funzionamento sotto determinate condizioni di esercizio, copre un periodo di circa 10 anni (periodo di esercizio).

Le misure di durezza superficiale ricavate si riferiscono a 10 sottogruppi, ciascuno di 50 profilati, dove per ciascuno profilato si sono effettuate tre misure di durezza superficiale.

Ciascun sottogruppo è stato ispezionato in un intervallo di tempo  $\Delta t \approx 3$  mesi circa e il tasso di guasto,  $\lambda = 0,000375$ , considerato approssimativamente costante nei 10 anni, è un dato che il Settore Controllo Qualità ha fornito tenendo conto dell'operatività dei profilati.

Nella realtà le carte di controllo tradizionali non prendono in considerazione tempi così lunghi, ma l'esempio applicativo pro-

posto tende fondamentalmente a far capire l'evoluzione nel tempo della variazione dei limiti di controllo, basata sulla funzione di affidabilità del prodotto sotto osservazione.

Per ciascun sottogruppo esaminato nel tempo, si è valutato a partire dal data-set di dati disponibili il valore medio in Barcol delle misure di durezza superficiale.

Per  $i = 1, 2, \dots, 10$  si sono ottenuti i 10 valori  $\Delta t_i$ .

La carta di controllo presenterà sull'asse delle ascisse il tempo di prelievo dei vari sottogruppi, suddiviso in intervalli  $\Delta t_i$ , e sull'asse delle ordinate i valori medi misurati per ciascun sottogruppo.

La coppia  $(\Delta t_i; \mu_i)$  sarà rappresentata sulla carta di controllo da un punto.

Si è calcolata poi la media dei valori medi,  $\mu_{tot} = 88,61$  Barcol (riportata sulla carta come una linea parallela all'asse delle ascisse) e la varianza, considerata costante,  $\sigma = 1,08$ .

I limiti di controllo stazionari, tipici di una carta di controllo tradizionale, sono dati da:

- LCS (Limite di Controllo Superiore):  $\mu_{tot} + 3\sigma$ ;
- LCI (Limite di Controllo Inferiore):  $\mu_{tot} - 3\sigma$ ;

I limiti di controllo variabili, introdotti nella carta affidabilistica, si basano sull'implementazione della funzione affidabilità come sorgente nota (data la curva di vita del prodotto) della loro evoluzione nel tempo, tenendo conto, peraltro, di un incremento di tolleranza assunto convenientemente nel rapporto costi/benefici:

- LCSv (Limite di Controllo Superiore variabile):  $\mu_{tot} + 3K\sigma + K'\sigma$ ;
- LCIv (Limite di Controllo Inferiore variabile):  $\mu_{tot} - 3K\sigma - K'\sigma$ ;

Per un tasso di guasto del prodotto  $\lambda(t)$  costante, la funzione affidabilità  $R(t)$  assume un andamento esponenziale decrescente, tale che  $K = f[R(t)] = e^{-\lambda t}$

Si è assunto inoltre, in funzione del prodotto in esame, un valore di  $K' = 1$ .

Si è riportato l'andamento nel tempo dei valori medi della caratteristica di qualità sulla carta di controllo, introducendo le modifiche relative al modello proposto.

La carta di controllo modellata secondo le impostazioni descritte è riportata nella figura 7.

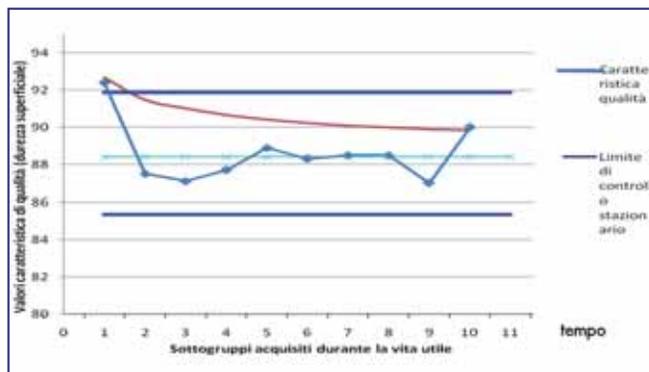


Figura 7 - Carta di controllo affidabilistica

Si noti che:

- Primo punto: dall'osservazione della carta tradizionale, a differenza di quella affidabilistica, sembrerebbe esserci inizial-

mente un fuori controllo. La bassa probabilità di avere un fuori controllo (come indicato dalla funzione affidabilità), infatti, indica che il punto visto sulla carta è un punto isolato, e pertanto il costo di un intervento di ripristino sul sistema (in questo caso sul profilato) non è conveniente.

- Decimo punto: dall'osservazione della carta tradizionale, a differenza di quella affidabilistica, si osserva una situazione di controllo, laddove invece il sistema sta riducendo le sue prestazioni, data la funzione affidabilità.

Sulla carta affidabilistica si riporta anche il limite di controllo inferiore, variabile, ma per semplicità, e, per l'esempio proposto, non è stato necessario evidenziarlo.

Se si considera il dato reale che prevede una variabilità nel tempo della varianza per un certo numero di sottogruppi di materiali compositi analizzati, dei quali si misura la durezza superficiale, allora la carta si presenterà come nella figura 8.

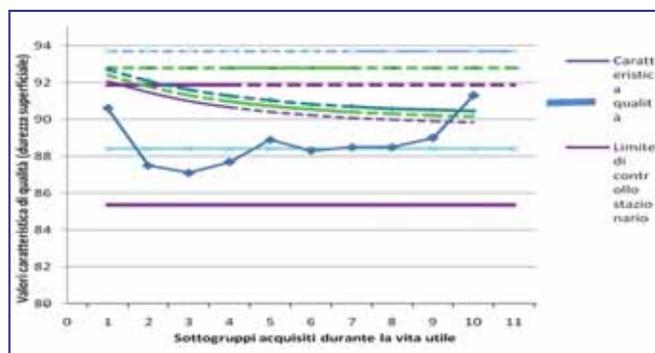


Figura 8 - Carta di controllo affidabilistica a varianza non costante

I primi quattro sottogruppi sono caratterizzati da una varianza pari a  $\sigma_1$ , minore della varianza  $\sigma_2$  dei successivi quattro sottogruppi esaminati, che è a sua volta minore della varianza  $\sigma_3$  degli ultimi sottogruppi esaminati.

$$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$$

Sia per la carta tradizionale, che quella affidabilistica, i limiti di controllo variano in funzione della varianza. Come precedentemente spiegato, infatti, la varianza aumenta nel tempo con una legge lineare del tipo:  $\sigma = a1 + a2t$ .

I limiti di controllo saranno allora il risultato dell'involuppo di curve parametriche in  $\sigma$ , parallele tra loro.

La linea limite da considerare è l'unione dei vari rami del fascio di curve, presi attraverso la conoscenza di  $\sigma(t)$ .

Nella figura 8 sono riportati i tratti di curva dei limiti superiori dello stesso colore per il confronto delle due carte, sottintendendo la possibilità di un confronto tenendo conto anche dei limiti inferiori.

## Conclusioni

La modellazione proposta nel presente articolo rappresenta una caratterizzazione della carta di controllo tradizionale per varia-

bili in condizioni più aderenti ai casi reali di applicazione, in cui è necessario da un lato ottimizzare i costi di monitoraggio e dall'altro viceversa disporre di uno strumento di controllo molto sensibile. Al fine di soddisfare entrambe queste due esigenze, che per loro natura sono antitetiche, si è fatto uso della funzione affidabilità, quale "guida modulante" dei limiti di controllo della carta con il risultato di avere un controllo più blando laddove le condizioni al contorno da un punto di vista progettuale lo consentono, evitando così, soprattutto nel caso di sistemi automatici di ripristino, interventi intempestivi e costosi ed al contempo di avere maggiore sensibilità nel rilevare eventi anomali laddove le condizioni al contorno presentano una maggiore probabilità che questi si verifichino.

All'interno del lavoro sono riportati i risultati quantitativi di una applicazione della modellazione proposta ad una azienda produttrice di profilati in materiale composito utilizzati in costruzioni edili.

Un ulteriore sviluppo della modellazione presentata su cui è in corso una ricerca è la caratterizzazione della "guida di modulazione" dei limiti della carta non solo in base alla funzione affidabilità, ma attraverso una più complessa analisi RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety).

## Riferimenti bibliografici

- [1] A. Desmond, "On the relationship between two fatigue life models", *IEEE Trans. Reliability*, vol R-35, 1986.
- [2] A. Desmond, "Stochastic models of failure in random environments", *Canadian J. Statistics*, vol 13, pp 171-183, Sep. 1985.
- [3] D.H. Wagner, "Stochastic concepts in the study of size effects in the mechanical strength of highly oriented polymeric materials", *J. Polymer Science*, vol B 27, pp 115-148, Jan. 1989.
- [4] G.K. Bhattacharyya, A. Fries, "Fatigue failure models - Birnbaum-Saunders vs inverse Gaussian", *IEEE Trans. Reliability*, vol R-31, pp 439-441, Dec. 1982.
- [5] M.G. Bader, A.M. Priest, "Statistical aspects of fibre and bundle strength in hybrid composites", *Progress in Science and Engineering of Composites* (T. Hayashi, K.Kawata, S. Umekawa, Eds), ICCM-IV, pp 1129-1136, Tokyo, 1982.
- [6] N. Johnson, S. Kotz, N. Balakrishnan, *Continuous Univariate Distributions (2<sup>nd</sup> ed.)*, John Wiley & Sons, 1995.
- [7] N.R. Mann, R. Schafer, N.D. Singpurwalla, *Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data*, John Wiley & Sons, 1974.
- [8] R.L. Smith, "Weibull regression models for reliability data", *Reliability Engineering and System Safety*, vol 34, pp 55-76, Jan 1991.
- [9] S. De Falco, "Control Process Measurements for Power Quality in Presence of Periodic Behaviour: an application on naval electrical systems", *Journal of EE. RR Electrical Engineering Research Report*, Dec. 2007.
- [10] S. De Falco, C. De Capua, R. Morello, N. Polese, "A measurement technique to improve quality characteristics in industrial processes" *10<sup>th</sup> Imeko TC7 Symposium*, June 30-July 2, Hotel "Saint-Petersburg", St.-Petersburg, Russia, 2004.