

Soluzioni per un Doe corretto

Mark J. Anderson, Shari L. Kraber

Questo articolo identifica otto soluzioni per avere successo nell'applicazione degli strumenti statistici del Design of Experiments (Doe). I responsabili della qualità che faranno proprie queste soluzioni potranno essere in grado di sostenere l'uso del Doe nel loro ambito organizzativo. Infine questo condurrà a miglioramenti progressivi nella qualità del prodotto e nell'efficienza del processo.

Il Design of Experiments (Doe) è una metodologia efficace per realizzare miglioramenti progressivi nella qualità di un prodotto e nell'efficienza di un processo. Ciò conduce alla diminuzione dei costi di produzione e quindi all'aumento dei margini profitto. Perché in Azienda non viene maggiormente utilizzato il Doe? In alcuni casi è semplice mancanza di conoscenza, ma anche quando le aziende forniscono una formazione adeguata, alcuni tecnici si oppongono al Doe perché richiede progettazione, disciplina e uso della statistica.

Il timore verso la statistica è spesso molto diffuso fra i manager aziendali. I professionisti che operano nell'ambito della qualità possono svolgere un ruolo importante nell'aiuto dei loro colleghi per superare queste barriere. Usare con successo il Doe dipende dalla comprensione di otto concetti fondamentali. Per illustrare questi concetti per raggiungere il successo, utilizzeremo due casi sperimentali di riferimento: uno studio di aumento della durata di un cuscinetto; uno studio sulla riduzione del ritiro dimensionale di pezzi in materiale plastico provenienti da un processo di stampaggio ad iniezione. Nel primo caso si focalizzerà l'attenzione su un *2-level Factorial Design*, dove ogni variabile di input è regolata su due livelli: elevato (+) e basso (-).

Questi design sono molto semplici, tuttavia estremamente potenti. Ad esempio, la figura 1 mostra il cubo risultante da un *2-level design* con tre fattori (heat, osculation, cage) che influenzano la vita di un cuscinetto (bearing life). Si noti il grande aumento all'angolo superiore destro del cubo. In questo caso due fattori interagiscono per produrre un inatteso miglioramento della vita del prodotto. Un esperimento Ofat (variazione di un fattore alla volta) non avrebbe mai rivelato tali interazioni.

I *full factorial design* sono molto più efficienti rispetto agli Ofat, perché fanno uso di design a più variabili. È semplicemente elaborazione parallela (Factorial design) contro elaborazione seriale (Ofat). Inoltre, non è necessario condurre

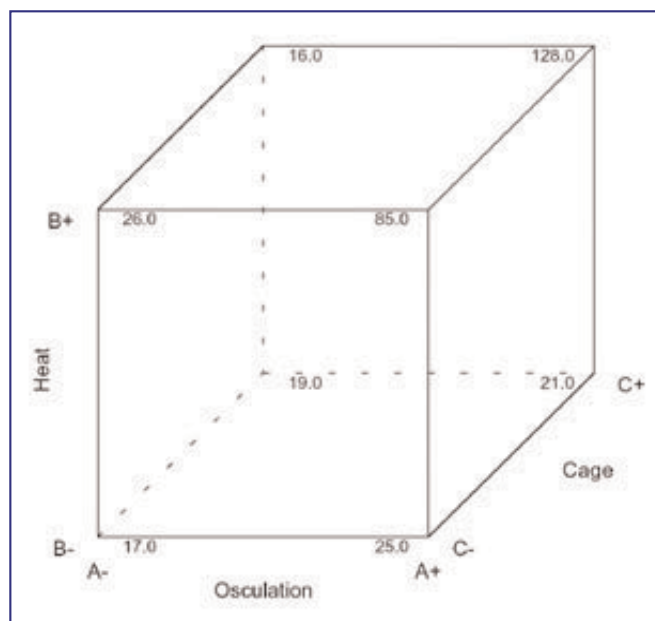


Figura 1 - 2-level design per tre fattori (vita di un cuscinetto)

tutte le prove dettate dalle possibili combinazioni di un *2-level factorial design*, specialmente quando si opera con 5 o a più fattori. Usando il *fractional design*, l'approccio a due livelli può essere esteso a molti fattori. Di conseguenza, questi Doe sono ideali per selezionare molti fattori allo scopo di identificare i pochi vitali che influenzano significativamente la variabile dipendente o risposta.

1 - Stabilire dei buoni obiettivi

La prima decisione da prendere prima della progettazione dell'esperimento è: "Qual è l'obiettivo o lo scopo di questo studio?". Lo scopo dello studio potrebbe essere quello di identificare i fattori che non sono critici per il processo, oppure essere quello di ottimizzare alcuni fattori critici. Un obiettivo ben definito conduce lo sperimentatore verso un Doe corretto. Per esempio, nella fase iniziale di un processo di sviluppo o di analisi dei guasti, è appropriata la scelta di un *fractional 2-level factorial design*. Questo tipo di Doe passa al vaglio un grande numero di fattori con un numero minimo di prove sperimentali.

Tuttavia, se il processo in analisi è già vicino alle condizioni ottimali, allora un *response surface design* può essere molto più appropriato. Esplorerà solo alcuni fattori su molti livelli. Se non si identificano gli obiettivi di uno studio, si possono pagare le conseguenze: tentando di studiare troppi o troppo pochi fattori; non misurando le variabili dipendenti, o risposte, corrette; arrivando a conclusioni già conosciute. Essenzialmente, obiettivi vaghi portano esclusivamente a perdite economiche e di tempo con frustrazione per tutti coloro che sono coinvolti nel progetto. Identificando gli obiettivi in anticipo, si crea e si intensifica una comprensione comune del

M.J. Anderson, S.L. Kraber, Consulenti ed autori di Design Expert, StatEase, Minneapolis (Usa); traduzione a cura di Maria Pia D'Ambrosio, Consulente Doe, SixSigmaIn.It

progetto e delle aspettative per il risultato atteso. Nel caso in studio relativo allo stampaggio ad iniezione, si desidera ridurre la variazione del ritiro dimensionale dei pezzi prodotti. Se il ritiro dimensionale può essere stabilizzato, allora le dimensioni dello stampo possono essere modificate ed adattate in modo che i pezzi possano essere prodotti in modo costante. I fattori ed i livelli da valutare sono illustrati in tabella.

FACTOR NAME	UNITS	LOW LEVEL	HIGH LEVEL
A: Mold Temp	Degrees F	130	180
B: Holding Pressure	PSIG	1200	1500
C: Booster Pressure	PSIG	1500	1800
D: Moisture	Percent	.05	.15
E: Screw Speed	Inches/sec	1.5	4.0
F: Cycle Time	Seconds	25	30
G: Gate Size	Mils	30	50

Tabella 1 - Fattori per uno studio Doe su un processo di Molding

Gli sperimentatori in questo caso hanno scelto un *2-level factorial design* con 32 prove sperimentali. L'insieme completo di tutte le possibili combinazioni richiederebbe 128 prove (2⁷), perciò questo caso ne rappresenta una frazione quarta.

2 - Misurare la variabile dipendente o risposta in modo quantitativo

Molti Doe falliscono perché la risposta non può essere misurata quantitativamente. Un esempio classico si incontra durante i controlli visivi per la qualità. Tradizionalmente, gli operatori di processo o gli ispettori hanno sviluppato un sistema qualitativo che usano per determinare se un prodotto è idoneo oppure è da considerare come scarto. Nel migliore dei casi, si possono avere dei campioni come riferimento per le condizioni minime di accettabilità. Anche se questo sistema può essere giusto per la produzione, non ha abbastanza precisione per un buon Doe.

Una rilevazione dei dati tipo idoneo/scarto può essere usata in un Doe, ma è molto grezza. Per esempio, se un processo produce tipicamente un tasso di pezzi scarti pari allo 0,1%, ci si aspetterebbe di trovare 5 pezzi difettosi su 5.000 pezzi. Allo scopo di condurre un semplice Doe con 3 fattori a due livelli ognuno (8 prove sperimentali), si avrebbe bisogno di utilizzare un minimo di 40.000 pezzi (8 x 5.000). Ciò garantirebbe di ottenere abbastanza difetti per giudicare il miglioramento, ma ci si può permettere il costo del relativo esperimento? Per gli scopi della sperimentazione, una scala di valutazione va bene. Persino una scala grezza da 1 a 5 sarà sicuramente migliore rispetto al semplice metodo: idoneo/scarto. Si deve definire una scala fornendo alcuni punti di riferimento per un confronto sotto forma di unità difettose o immagini ed addestrare da tre a cinque persone ad utilizzare questa scala. Durante l'esperimento, ogni ispettore addestrato dovrebbe valutare ogni unità.

Alcuni ispettori possono tendere a valutare in modo differenziato ma questa imparzialità può essere rimossa nell'analisi inserendo i blocchi (si veda il concetto #5). Per un buon Doe, il metodo di collaudo deve fornire costantemente risultati certi. Nello studio relativo allo stampaggio ad iniezione, gli sperimentatori misureranno la percentuale del ritiro dimensionale di una dimensione critica del pezzo. In più, potrebbero valutare i pezzi in relazione alle imperfezioni della qualità di superficie.

3 - Condurre delle repliche per smorzare la variazione incontrollabile (rumore)

Il buonsenso dice che più volte si replica (ripete) un dato insieme di condizioni, più precisamente si può valutare la variabile dipendente o risposta. La replica migliora la probabilità di rilevazione dell'effetto statisticamente significativo (il segnale) nel mezzo di variazione naturale del processo (il rumore). In alcuni processi, il rumore copre il segnale. Prima di condurre un Doe, è consigliabile valutare il rapporto segnale/rumore. Si devono quindi determinare quante prove

sperimentali saranno richieste per il Doe.

In primo luogo si deve decidere quanto si desidera rilevare della variazione del segnale. Quindi si deve valutare il rumore. Queste informazioni possono essere ricercate con: carte di controllo; studi della Capability Analysis; analisi della varianza (Anova) da Doe precedenti; supposizioni basate sull'esperienza. Gli statistici che hanno elaborato i *2-level factorial design* hanno incorporato una replica "nasosta" entro le matrici del test.

Il livello della replica è una funzione diretta della dimensione del Doe. Si può usare la seguente tabella per determinare quante prove nel *2-level factorial design* sono necessarie per fornire una probabilità 90% di rilevare il segnale voluto (cfr il riferimento di Watts nella bibliografia). Se non ci si può permettere di condurre tutte le prove necessarie, allora si deve vedere cosa può essere fatto per diminuire il rumore. Per esempio, la tabella mostra un minimo di 64 prove per un

Signal to Noise Ratio (Δ/σ)	Minimum Number of Runs
1.0	64
1.4	32
2.0	16
2.8	8

Tabella 2 - Numero di Run per 2-level factorial come funzione di Signal-to-Noise

rapporto segnale/rumore di 1. Tuttavia, se si potesse ridurre a metà il rumore, il rapporto segnale/rumore raddoppierebbe (a 2), riducendo così le prove sperimentali da 64 a 16. Se non si può ridurre il rumore, si deve quindi accettare un aumento del segnale rilevabile (l'effetto minimo che sarà rivelato dal Doe). Si può migliorare la potenza del Doe aggiungendo repliche reali in cui le condizioni sono duplicate. Non si può ottenere ciò con la ripetizione dei campioni e/o delle misure. L'intero processo deve essere ripetuto dall'inizio al-

la fine. Se si producono diversi campioni da una data prova sperimentale, si inserisce la risposta come valore medio. Per lo studio relativo allo stampaggio ad iniezione, le tabelle di controllo rivelano uno scarto quadratico medio pari a 0,60; si vorrebbe rilevare un effetto pari a 0,85. Di conseguenza il rapporto di segnale/rumore è circa 1,4. Il numero adatto di prove per questo esperimento fattoriale a due livelli è 32 esperimenti. Si decide di non aggiungere ulteriori repliche per vincoli legati al tempo, ma parecchi pezzi saranno prodotti da ciascuna prova. La risposta utilizzata sarà allora il ritiro dimensionale medio per pezzo, per smorzare così la variabilità nei pezzi nella misura stessa.

4 - Randomizzare il Run Order

L'ordine in cui si conducono gli esperimenti dovrebbe essere randomizzato per evitare l'influenza dalle variabili incontrollate quale l'usura dell'attrezzatura, la temperatura dell'ambiente e le variazioni della materia prima.

Questi cambiamenti, che sono spesso correlati al tempo, possono influenzare significativamente la variabile dipendente o risposta. Se non si randomizza il run order (ordine di conduzione delle prove), il Doe può indicare effetti del fattore che sono realmente dovuti a variabili incontrollate, che avvengono proprio per variazioni nello stesso momento. Per esempio, si supponga di condurre un esperimento sull'inzeppamento di una fotocopiatrice nei mesi estivi.

Durante la conduzione del Doe, si conducono tutte le prove con la regolazione a livello basso del fattore A, e successivamente si conducono tutte le prove con le regolazioni a livello alto del fattore A (quindi nessuna randomizzazione).

Nel frattempo (per esempio) l'umidità aumenta del 50%, generando quindi un effetto significativo sulla risposta (le proprietà fisiche della carta dipendono molto dall'umidità). Nella fase di analisi, il fattore A sembra allora essere significativo, ma è realmente il cambiamento del livello di umidità che ha causato l'effetto. La randomizzazione avrebbe impedito questa confusione. Si deve sempre fare!

5 - Escludere fonti conosciute di variazione

Inserire uno o più blocchi permette di rimuovere il rumore causato dalle fonti conosciute di variazione, come il lotto del materiale grezzo, variazioni del turno di lavoro, o differenti attrezzature utilizzate. Dividendo le prove sperimentali in blocchi omogenei e poi rimuovendo aritmeticamente la differenza, si aumenta la sensibilità del Doe.

Non si devono porre blocchi su una variabile che si desidera studiare. Per esempio, se si desidera misurare la differenza fra due fornitori di una materia, si devono includere come un fattore da studiare nel Doe. Nello studio relativo allo stampaggio ad iniezione, si vorrebbero includere tutte le attrezzature utilizzate. Ci sono 4 linee nel reparto produttivo, che possono differire un po' tra di loro. Si è perciò pensato di suddividere il Doe in 4 blocchi di 8 prove per linea di produzione. Conducendo tutte le prove sulle linee simultaneamente,

l'esperimento verrà condotto 4 volte più velocemente. Tuttavia, in questo caso, dove il Doe già è frazionato, c'è un costo connesso con la suddivisione nei blocchi: l'interazione di A (temperatura dello stampo) e B (pressione di chiusura dello stampo), non può essere valutata a causa della confusione. La confusione è un effetto secondario sfavorevole dei *factorial design* frazionari e/o bloccati. Si discuterà questo argomento nella sezione seguente.

6 - Conoscere quali effetti sono confusi (se lo sono)

Una confusione indica che si sono cambiate due o più cose allo stesso tempo nello stesso modo. La confusione è una caratteristica critica e spesso trascurata nei *Taguchi design*, nei *Plackett-Burman design* o negli *fractional factorial design* standard. Per esempio, se si cerca di studiare 3 fattori in soltanto 4 prove, cioè una frazione mezza, gli effetti principali saranno confusi con le interazioni a due fattori. Se si è fortunati, soltanto gli effetti principali saranno attivi, ma molto probabilmente ci sarà almeno un'interazione.

Il caso relativo ai cuscinetti (presentato nella figura 1) può essere utilizzato per mostrare quanto possa essere pericoloso condurre prove con una frazione a risoluzione così bassa.

Factor A: Osculation	Factor B: Heat	Interaction AB	Factor C: Cage	Response: Life (Hours)
-1	-1	+1	-1	47
+1	-1	-1	-1	25
-1	+1	-1	-1	26
+1	+1	+1	-1	85
-1	-1	+1	+1	19
+1	-1	-1	+1	24
-1	+1	-1	+1	46
+1	+1	+1	+1	128

Tabella 3 - Matrice delle prove nel caso dei cuscinetti

La Tabella 3 mostra la matrice delle prove di un design fattoriale completo. In questo caso, l'interazione AB è molto significativa, perciò è inclusa nella matrice (si noti che questa colonna è il prodotto delle colonne A per B). La frazione mezza è rappresentata dalle righe scritte in neretto e ingrandite. I valori della variabile dipendente, o risposta, per le altre prove sono state eliminate. Si osservi che nella colonna relativa alla interazione AB, la configurazione del livello alto (+1) e la configurazione del livello basso (-1) sono identiche a quelle del fattore C.

Le due colonne sono identiche. Perciò, utilizzando la frazione mezza, viene completamente confuso l'effetto reale dell'interazione AB con il fattore C. La confusione è un problema che può essere evitato conducendo soltanto i *2-level factorial design* completi oppure i *fractional factorial desi-*

gn ad alta risoluzione, ma questi non sarebbero pratici. L'articolo di Box citato nella bibliografia fornisce i particolari relativi alla confusione per i disegni frazionati standard. Tuttavia, è molto difficile trovare informazioni pubblicate sulle strutture confuse per i *Plackett-Burman Design* o per i *Taguchi Design*. Questi design hanno molto spesso una risoluzione bassa e quindi forniscono risultati molto ingannevoli sugli effetti specifici. Se ci si deve servire di questi design non standard, condurre sempre un design di valutazione per valutare che cosa è confuso.

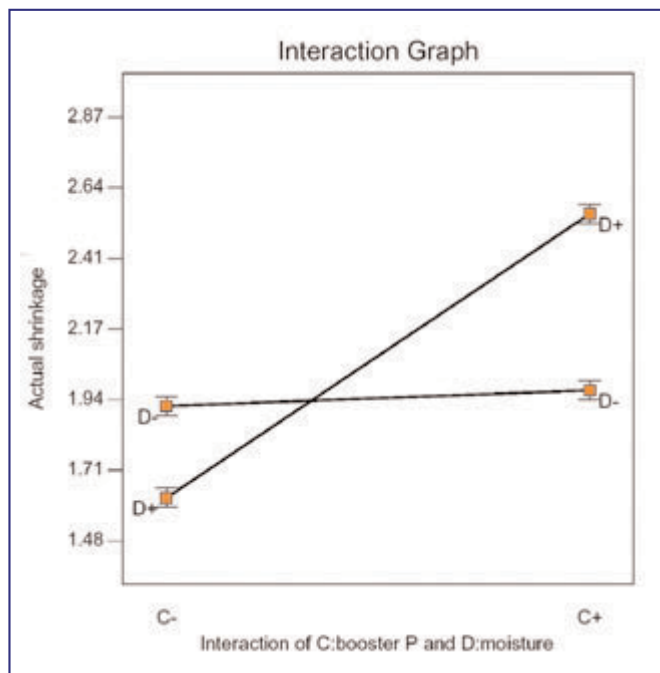


Figura 2 - Interazione CD nello stampaggio a iniezione

Un buon software specifico per il Doe fornirà i particolari necessari, anche se le prove sono cancellate o i livelli cambiati. Allora se qualunque effetto è significativo, si saprà se contare sui risultati o procedere con la verifica.

Lo studio dello stampaggio ad iniezione è un progetto fattoriale frazionario con una risoluzione mediocre: parecchie interazioni a due fattori sono confuse. Una valutazione approfondita del design fornisce i seguenti dettagli: $CE=CE+FG$, $CF=CF+EG$, $CG=CG+EF$, dove il segno di uguale indica la confusione. Per esempio, se si valuta la matrice degli effetti di CE verso FG, si vedrà una correlazione perfetta. Il simbolo + nella relazione della confusione dice che l'effetto calcolato potrebbe essere dovuto a CE più FG. Se questi o qualunque delle altre interazioni confuse sono significative, sarà necessario ulteriore lavoro.

7 - Condurre una serie sequenziale di esperimenti

Le prove sperimentali in un Doe dovrebbero essere condotte in un modo ripetitivo e standardizzato così che le informazioni che vengono apprese in un esperimento possano essere applicate all'esperimento successivo. Per esempio, piuttosto che condurre prove in un esperimento molto grande, con molti fattori, usando quindi la maggior parte delle risorse, si

può considerare di iniziare da un esperimento più piccolo e poi basarsi sui risultati. Una serie tipica di esperimenti consiste in uno screening design (fattoriale frazionario) per identificare i fattori significativi, quindi un *full factorial design* o un *response surface design* per caratterizzare completamente o modellare gli effetti, seguito da ultimo da prove di conferma per verificare i risultati.

Se si commette un errore nella selezione delle regolazioni dei fattori o delle variabili dipendenti o risposte in un esperimento molto grande, ciò può essere molto costoso. Si dovrebbe pianificare una serie di esperimenti sequenziali in modo da rimanere flessibili. Una buona regola pratica suggerisce di non investire più del 25% del budget nel primo Doe. Per esempio, nel caso dello stampaggio ad iniezione, gli ulteriori studi o prove di conferma dovrebbero essere inclusi nel programma generale.

8 - Confermare sempre i risultati critici

Dopo tutto lo sforzo che coinvolge la pianificazione, la conduzione delle prove e l'analisi del progetto sperimentale, è molto emozionante ottenere i risultati del lavoro in oggetto.

C'è una naturale tendenza ad afferrare in modo impaziente i risultati, precipitarsi velocemente in produzione ed affermare: "abbiamo la risposta! Questo risolverà il problema!". Prima di fare ciò, si ha bisogno di dedicare del tempo alla conduzione di una prova di conferma e verificare il risultato. Software specifici per il Doe forniscono un intervallo di predizione per confrontare i risultati entro alcuni gradi di confidenza. Si ricordi che in statistica non si tratta mai con valori assoluti, ma c'è sempre incertezza nelle affermazioni. Bisogna essere sicuri di controllare due volte i risultati.

Nel caso dello stampaggio ad iniezione, i risultati dell'esperimento hanno rivelato una significativa interazione fra pressione dell'alimentatore e umidità (CD). L'interazione non è confusa con le altre interazioni a 2 fattori, perciò il risultato è chiaro. Come indicato dalla la linea piatta nella figura 2, il ri-

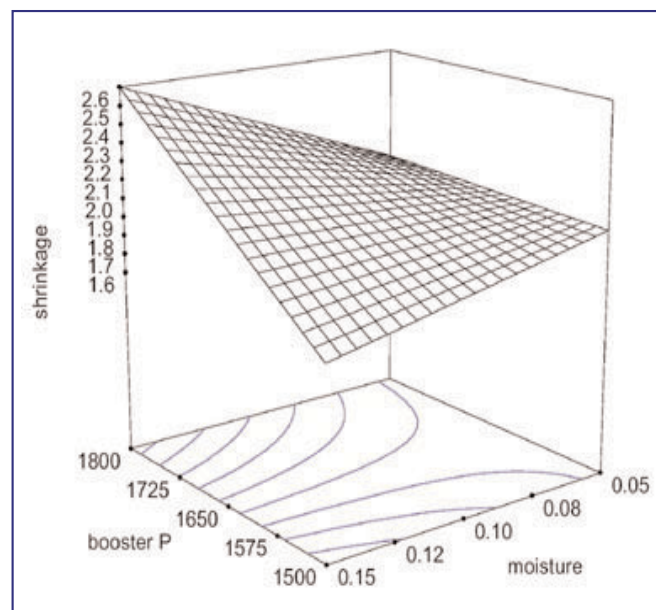


Figura 3 - Grafico 3D per la risposta relativa al ritiro dimensionale

tiro dimensionale sarà stabilizzato mantenendo l'umidità bassa. Ciò è conosciuta come una condizione operativa robusta. I *contour graph* e le proiezioni a tre dimensioni aiutano a visualizzare la superficie di risposta. Per ottenere le condizioni operative robuste, si devono cercare le zone piane nella superficie di risposta.

La Figura 3 mostra un grafico a tre dimensioni per i fattori C e D nel sistema di stampaggio ad iniezione. Si noti come la superficie si appiattisce quando l'umidità diminuisce. Questa è una regione di stabilità per la risposta relativa al ritiro dimensionale. Le superfici 3D sono di grande effetto/impatto grafico, ma sono buone (usabili) quanto sono buoni i dati generati per creare il modello teorico. I risultati ancora devono essere confermati. Se si desidera generare superfici più sofisticate, si dovrebbe continuare lo studio con i metodi relativi al response surface (Rsm) per l'ottimizzazione. Questi design richiedono almeno 3 livelli di ogni fattore, così si dovrebbe limitare lo studio ai pochi fattori vitali che sono sopravvissuti alla fase dello screening.

Conclusione

Il Doe è uno strumento molto potente utilizzabile in tutte le industrie manifatturiere. Le chiavi del successo sono:

- 1 - Stabilire chiari obiettivi.
- 2 - Misurare le variabili dipendenti o risposte quantitativamente.
- 3 - Condurre delle repliche per moderare la variazione incontrollabile.
- 4 - Randomizzare il run order (ordine di esecuzione delle prove).
- 5 - Escludere le fonti conosciute di variazione.
- 6 - Conoscere quali effetti sono confusi (se c'è ne sono).
- 7 - Condurre una serie sequenziale di esperimenti.
- 8 - Confermare sempre i risultati critici.

I manager della qualità che incoraggiano l'uso del Doe promuovendo questi concetti basilari aumenteranno notevolmente le probabilità per apportare miglioramenti di innovazione della qualità del prodotto e della efficienza del processo.

Riferimenti

- Anderson, M.J., Whitcomb, P.J. [1997], "Software Sleuth Solves Engineering Problems", *Machine Design*, 6/5/97.
- Anderson, M.J., Whitcomb, P.J. [1997], "Breakthrough Improvements with Experiment Design", *Rubber and Plastics News*, 6/16/97.
- Box, Hunter and Hunter [1978], *Statistics for Experimenters*, John Wiley & Sons.
- Watts, E. G. [1997], "Explaining Power Using Two-Level Factorial Designs", *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, No. 3, (July). ■