

SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA INTEGRATA PER L'ANALISI DEI RISCHI DI SISTEMI MECCANICI E MACCHINE

Citti, P., Arcidiacono, G., Delogu, M., Mazzeranghi, A.
Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali,
Università di Firenze,
Via S. Marta 3 - 50139 Firenze

SOMMARIO

Progettare oggi una macchina sicura (*Design for Safety* [1]) richiede una conoscenza approfondita dello stato dell'arte in merito agli strumenti di supporto esistenti, alcuni dei quali si basano su considerazioni soggettive unite a semplici calcoli progettuali, altri che sfruttano metodologie affidabilistiche al fine di una migliore gestione degli aspetti inerenti la sicurezza delle macchine.

Nella presente memoria si sviluppa l'Analisi dei Rischi di una fresatrice a montante mobile con lo scopo di evidenziare come la maggior parte dei problemi di sicurezza possano essere risolti per via soggettiva e induttiva, ma anche come, in alcuni casi, sia necessario fare ricorso a note metodologie affidabilistiche (per esempio le tecniche *Failure Modes Effects and Criticality Analysis* [5], più note come FMECA o FMEA se di approccio solo qualitativo) per ottimizzare il progetto.

In definitiva l'obiettivo è quello di suggerire un approccio progettuale semplice, ma, al tempo stesso, anche efficace e rigoroso: semplice per garantire anche alla Piccola e Media Industria la possibilità di recepire e rispettare quanto le norme prescrivono, efficace e rigoroso per evitare di tralasciare alcuni aspetti fondamentali per la sicurezza delle macchine e dei sistemi meccanici.

1 OBIETTIVI DELL'APPROCCIO PROGETTUALE SVILUPPATO

Il mercato attuale e la legislazione vigente richiedono che le macchine ed i sistemi meccanici messi a disposizione degli operatori siano caratterizzati da un livello di sicurezza secondo quanto prescritto dalla legislazione vigente. La cosiddetta *Direttiva Macchine* (ovvero le direttive 89/392/CEE, 91/368/CEE, 93/44/CEE e 93/68/CEE concernenti il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati Membri relative alle Macchine, recepita in Italia con il DPR 459/96, pubblicato sull'allegato della G.U. del 6/9/96), impone nell'allegato I di integrare la sicurezza nella progettazione. Tale principio sottolinea come la sicurezza del prodotto macchina debba essere pensata e perseguita già fin dalle prime fasi della progettazione e non, come spesso in passato accadeva, a posteriori sulla macchina finita.

La priorità degli interventi proposta dalla Direttiva in questione stabilisce che “*per la scelta delle soluzioni più opportune il fabbricante deve applicare i seguenti principi, nell'ordine indicato:*”

- *eliminare o ridurre i rischi nel miglior modo possibile (integrazione della sicurezza nella progettazione e nella costruzione della macchina);*
- *adottare le misure di protezione necessarie nei confronti dei rischi che non possono essere eliminati;*
- *informare gli utilizzatori dei rischi residui dovuti all'incompleta efficacia delle misure di protezione adottate, indicare se è richiesta una formazione particolare e segnalare se è necessario prevedere un dispositivo di protezione individuale.”*

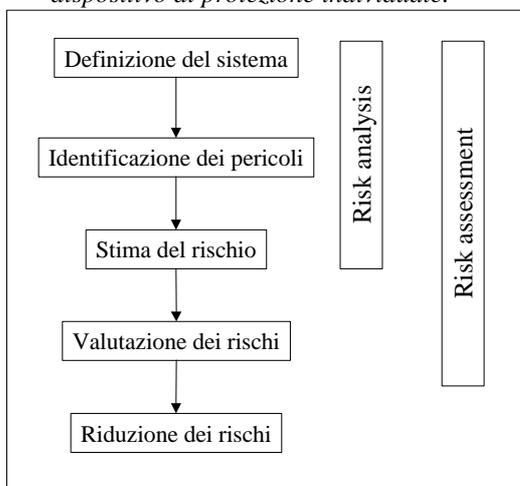


Figura 1. Procedura di gestione dei rischi in progettazione

È, quindi, necessario strutturare l'attività progettuale inserendo fra gli obiettivi primari la sicurezza, ragion per cui ai buoni intenti deve seguire una corretta organizzazione del lavoro di progettazione e l'impiego di metodologie e strumenti di supporto adeguati.

Le “verifiche di sicurezza” andrebbero effettuate con continuità durante la progettazione; di fatto, il progettista non potrà fare riferimento in ogni istante all'intero panorama normativo esistente, ma avrà come obiettivo generale la sicurezza del prodotto per la cui garanzia dovrà, poi, effettuare una serie di verifiche periodiche in corrispondenza di alcuni momenti chiave del progetto. Le revisioni del progetto dal punto di vista della sicurezza possono essere effettuate per esempio:

- al termine dell'analisi della specifica, quando sono stati effettuati i primi studi di fattibilità;
- al termine della progettazione concettuale, quando sono state effettuate tutte le scelte fondamentali;

- al termine della progettazione di dettaglio, quando la macchina risulta completamente definita e pronta per essere prodotta;
- sul prototipo della macchina.

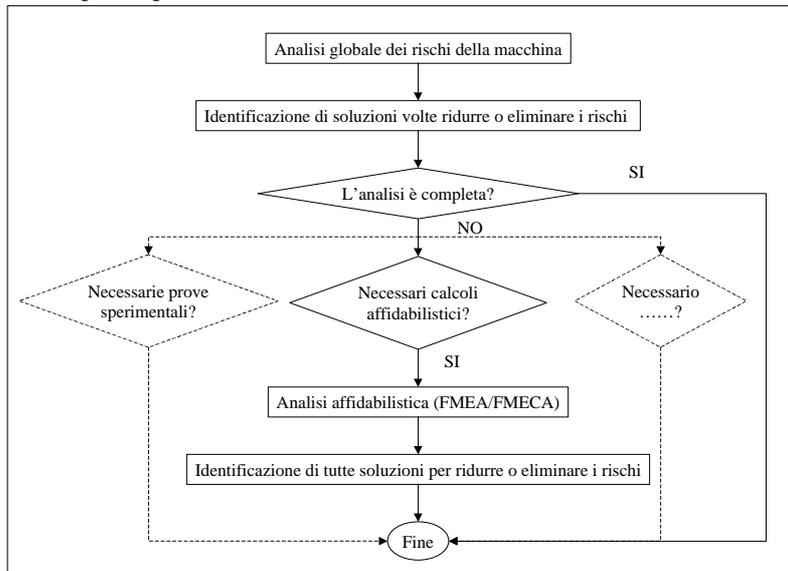


Figura 2. Approccio progettuale suggerito

fotografia dell'Analisi dei Rischi della macchina, si pone, quindi, come obiettivo quello di associare alla creatività dei progettisti opportuni strumenti di supporto nella scelta delle migliori soluzioni progettuali in ottica sicurezza: fra questi strumenti, per esempio, quelli di natura affidabilistica permettono di quantificare in maniera oggettiva, grazie a banche dati attendibili ed esaurienti, i pericoli presenti.

In merito a ciò, è bene sottolineare che, mentre per i componenti elettronici esistono banche dati (ad esempio le MIL-STD-756 e MIL-HDBK-217) la cui raccolta e stesura è stata resa possibile dalla standardizzazione e dalla produzione in massa dei componenti stessi, per quelli meccanici la predizione affidabilistica, attraverso la realizzazione di banche dati relative, risulta più complessa in quanto:

- uno stesso componente meccanico viene spesso adibito a diverse funzioni ed è raro avere a disposizione dati di guasto relativi a specifiche applicazioni di componenti non standardizzati;
- i tassi di guasto dei componenti meccanici non sono normalmente descritti da distribuzioni costanti nel tempo, a causa di fenomeni legati alla fatica, all'usura, etc., imputabili allo stato di degradazione del componente;
- l'affidabilità dei componenti meccanici è molto sensibile alle condizioni di carico ed al tasso di utilizzo più di quanto lo siano i componenti elettronici;
- la definizione di un guasto per un componente meccanico dipende molto dalla sua applicazione.

Nonostante queste problematiche, sono in via di evoluzione software in grado di gestire al meglio anche la componentistica meccanica attraverso banche dati come ad esempio la "NPRD95" [4, 5 e 9] (Nonelectronic Parts Reliability Data) proveniente dal Reliability Analysis Center che riporta dati raccolti in anni di esperienze, relativi a tassi di guasto di migliaia di componenti standard di tipo meccanico ed elettromeccanico.

Esistono, poi, altre banche dati più sofisticate e flessibili che inserendo le specifiche tecniche di ciascun componente (caratteristiche geometriche, carichi, etc.), consentono, attraverso l'utilizzo di modelli matematici e con il supporto di curve (vedi figura paragrafo 2.2) e coefficienti ottenuti sperimentalmente, di trattare il calcolo del tasso di guasto nelle più svariate condizioni operative ed ambienti di lavoro.

2 APPLICAZIONE E ANALISI DEI RISULTATI

Lo studio è stato svolto per una fresatrice a montante mobile prodotta dalla TECMU MC di Piacenza¹. Una foto generale della macchina (senza protezioni), il layout della macchina standard ed i principali accessori sono mostrati nelle figure 3, 4 e 5. Le principali caratteristiche tecniche della macchina standard sono:

- Corsa asse X (traslazione longitudinale tavola): 2500 mm.
- Corsa asse Y (verticale): 1500 mm.
- Corsa asse Z (traslazione trasversale montante): 1300 mm.

¹ Si ringrazia la TECMU MC S.r.l., Località Cabina, Grazzano Visconti, 29029 Vigolzone, Piacenza, per la collaborazione e la disponibilità offerte.

Al di là dei metodi che si possono applicare, gli aspetti di rischio che caratterizzano una macchina dovrebbero essere gestiti secondo il flusso logico di figura 1, ispirato a quanto suggerito dalla norma EN 1050 "Safety of machinery - Risk assessment" [10].

Naturalmente, una volta definiti gli interventi volti a rendere sicura la macchina, è necessario ripetere l'Analisi e la Valutazione dei Rischi per stimare l'effettivo impatto delle modifiche progettuali.

A fronte di quanto detto, l'approccio progettuale suggerito nel presente lavoro (figura 2), partendo dalla

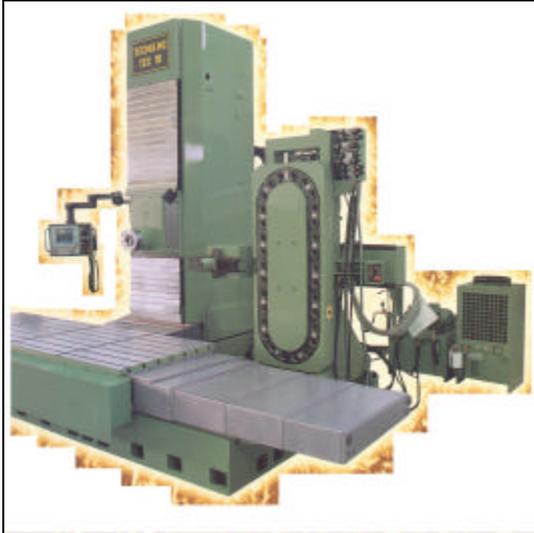


Figura 3. Vista generale della macchina senza sistemi di protezione

- Avanzamenti rapidi: 17000 mm/min.
- Avanzamenti di lavoro: 10000 – 17000 mm/min.
- Dimensioni tavola: 3000x1140 mm.
- Carico massimo: 13000 kg.
- Velocità standard mandrino: 4000 giri/min.
- Gamme velocità: 2
- Coppia massima: 1000 Nm.

A seconda degli allestimenti, la macchina può essere dotata di un cambio utensili automatico (ATC) e di una testa orizzontale standard (figura 5) o di una testa verticale (opzionale).

In fase di sviluppo del progetto l'Analisi dei Rischi, realizzata al termine dello studio della specifica, della progettazione concettuale e della progettazione di dettaglio, hanno messo in luce che una parte dei rischi che caratterizzano la macchina non possono essere eliminati all'origine. In particolare, la macchina presenta alcuni elementi in movimento a velocità ben definite a seconda delle necessità di lavorazione: la tavola, il montante, il supporto del mandrino e l'utensile. Non è

possibile individuare soluzioni progettuali alternative che escludano la presenza di questi o di altri elementi in movimento, se si vuole eseguire una lavorazione di fresatura. Si dovrà, quindi, intervenire mediante appropriate protezioni e/o sistemi di sicurezza per eliminare o ridurre al massimo i rischi associati con tali elementi.

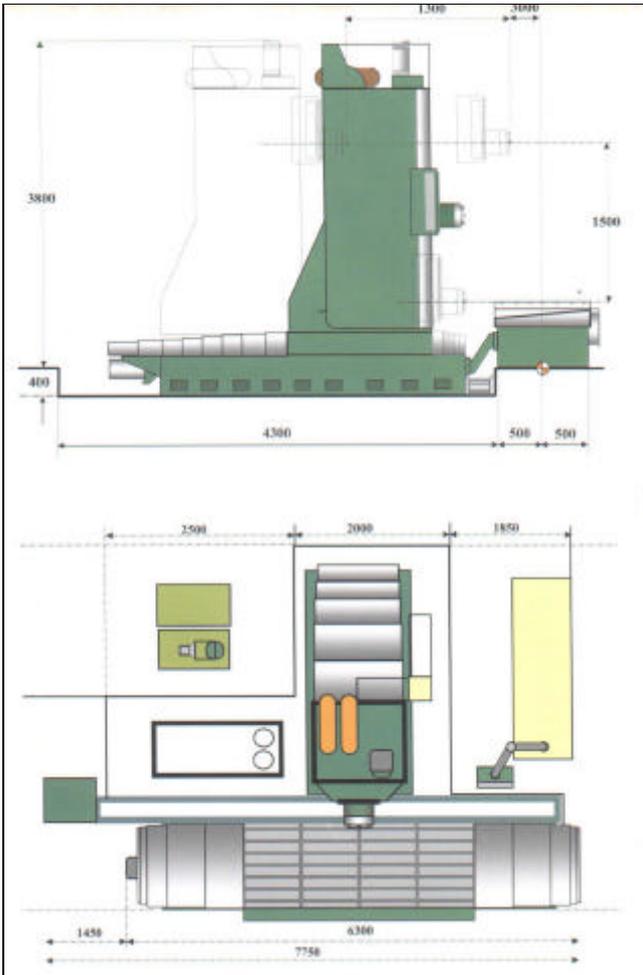


Figura 4. Configurazione standard della macchina con cambio utensili automatico

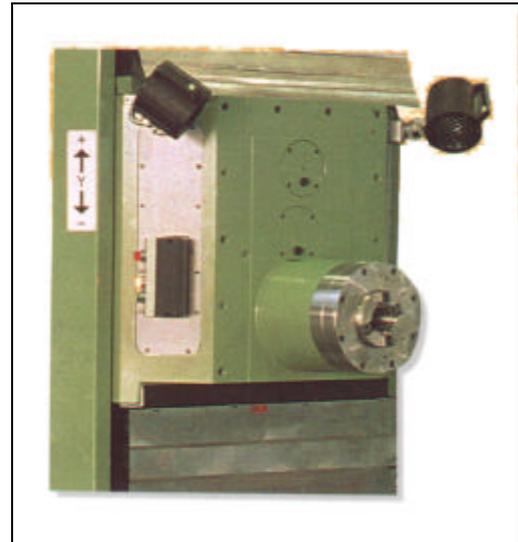


Figura 5. Mandrino orizzontale

Le macchine di questo tipo, costruite dalla stessa TECMU o dalla concorrenza nazionale e internazionale, utilizzano sistemi di protezione integrale per garantire il livello di sicurezza richiesto dalla legislazione. Tali sistemi di protezione variano sia per la realizzazione, che per la logica di controllo. Obiettivo è stato quello di costruire un sistema che, essenzialmente, segregando la macchina e proteggendo l'operatore da eventuali proiezioni, consenta a quest'ultimo di lavorare in modo efficace e sicuro senza indurlo a

manomettere i sistemi di protezione stessi. Il layout schematico del sistema di protezione, nato dalla osservazione della concorrenza (*benchmarking*), potrebbe essere quello indicato in figura 6. Le protezioni sono generalmente realizzate in lamiera o, in casi meno frequenti, in rete metallica (per consentire

all'operatore l'osservazione della lavorazione, si utilizzano finestrate in policarbonato antisfondamento opportunamente posizionate). Nelle protezioni sono presenti alcuni portelli per l'accesso degli operatori alla zona di lavoro e per l'attrezzaggio della tavola. Le protezioni devono essere interbloccate per impedire l'accesso alla zona segregata quando la macchina è caratterizzata da modalità di funzionamento potenzialmente pericolose.

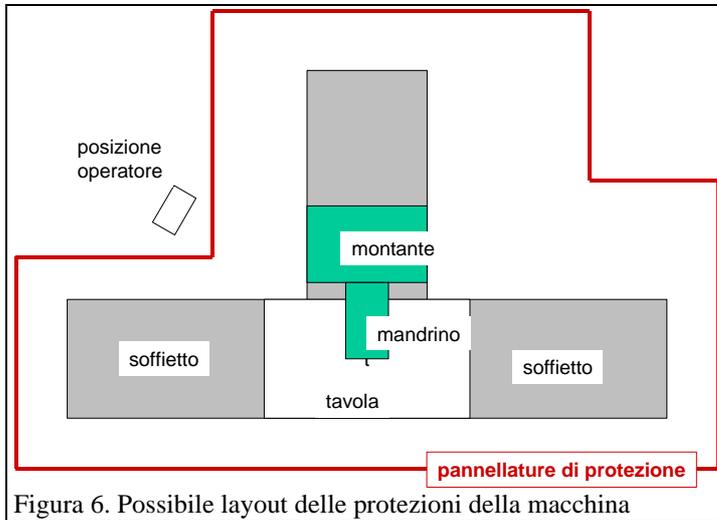


Figura 6. Possibile layout delle protezioni della macchina

2.1 Analisi dei Rischi

L'Analisi dei Rischi è stata eseguita con riferimento a una lista di controllo che riporta i pericoli che possono caratterizzare una macchina, così come suggeriti dalla norma UNI EN 292/1 [12]. La Valutazione dei Rischi è stata eseguita prendendo spunto dalla appendix E della EN 1050 [10], che definisce quattro categorie costituenti il rischio e, per ognuna di esse, due o tre livelli di criticità (validi se il rischio è effettivamente presente sulla macchina). Esiste un altro livello (0) associato alla completa eliminazione del rischio. Il prospetto delle categorie, dei livelli e dei valori numerici attribuiti

agli stessi è riportato in tabella I. Per ottenere un indice riassuntivo delle categorie suddette, così come implicitamente suggerito dalla norma, si utilizza l'indice Cr dato dal prodotto: $Cr = G * P * Es * Ev$.

Categoria	Livelli	Indice numerico
Gravità del possibile danno. (G)	Nulla	0
	Ferita o danno alla salute lieve	1
	Ferita o danno alla salute grave	3
	Morte	9
Probabilità che si verifichi un evento che causa danni. (P)	Nulla	0
	Bassa	1
	Media	3
	Alta	9
Frequenza di esposizione. (Es)	Nulla	0
	Raramente o abbastanza spesso	1
	Da frequente a continua	3
Possibilità di evitare il pericolo quando si manifesta (evitabilità). (Ev)	Completa	0
	Possibile in condizioni specifiche	1
	Scarsamente possibile	3

Tabella I. Indici di criticità

Un estratto dell'Analisi dei Rischi è riportato in tabella II limitatamente ai rischi di carattere meccanico; i rischi più critici sono risultati quelli connessi con i movimenti della macchina (assi X, Y e Z di traslazione) e con la rotazione dell'utensile: schiacciamento, urto, cesoiamento etc. o proiezione di trucioli o di parti di macchina.

I rischi connessi con i movimenti della macchina possono essere ridotti mediante opportune segregazioni interbloccate, che non dovranno, però, impedire l'accesso agli operatori durante alcune procedure quali, per esempio, la definizione degli zeri del pezzo. Tali operazioni, verranno, quindi, eseguite con la macchina in movimento, ma a velocità ridotta e comandata in manuale con comandi di JOG "a uomo morto". Dato che queste soluzioni non eliminano del tutto i rischi presenti, i c.d. rischi residui, connessi con i movimenti della

macchina, verranno gestiti mediante opportune procedure di lavoro.

La proiezione di parti di macchina può avvenire a seguito di rotture di alcuni componenti o di errori dell'operatore (per esempio nello staffaggio del pezzo o nel controllo del programma del CN): in particolare, una rottura nel sistema di bloccaggio utensile può provocare la proiezione dell'utensile completo di codolo e, in questo caso, la massa complessiva risulta particolarmente critica, in quanto costringerebbe a realizzare tutte le protezioni antisfondamento con spessori consistenti. La proiezione del fresino o dei trucioli di lavorazione, anche se le masse in gioco sono molto più ridotte, richiede, comunque, una protezione che, però, potrebbe essere sensibilmente più leggera. Si è, quindi, deciso di realizzare la segregazione dai rischi dovuti ai movimenti della macchina idonea anche a proteggere contro le proiezioni di pezzi di parti meccaniche. Per ottimizzare, però, il progetto, ovvero per non sovradimensionare le protezioni, si è deciso di analizzare in modo più approfondito (mediante la FMEA/FMECA) il caso di proiezione dell'utensile completo di codolo a seguito di una rottura dell'utensile stesso o del sistema di fissaggio.

Rischio	Presenza		Rischio residuo		Valutazione del rischio Indici G, P, Es, Ev = Cr	Soluzioni adottate Indici G, P, Es, Ev = Cr	Riferimenti e note
	SI	NO	SI	NO			
Pericoli di natura meccanica dovuti a:							
Schiacciamento	SI		SI		Movimenti mandrino (Y), tavola (X) e montante (Z) 9, 9, 1, 1 = 81	In condizioni di normale funzionamento in automatico (AUTO) segregazione dell'intera zona di lavoro con portelli interbloccati che impediscono l'accesso quando la macchina è in funzione in modalità di lavoro potenzialmente pericolose. 9, 9, 0, 1 = 0 In attrezzaggio o manutenzione, con macchina in manuale (MANU) limitazione delle velocità di traslazione e procedure di lavorazione 9, 3, 1, 1 = 27	prEN 13128: velocità max traslazione quando gli elementi in movimento sono accessibili: 2m/min le protezioni sono realizzate evitando rischi aggiuntivi di schiacciamento essendo posizionate secondo quanto indicato dalla UNI EN 349 gli interblocchi sono realizzati secondo la UNI EN 1088
Cesoiamento	SI		SI		Fra la testa del mandrino e pezzo per movimenti mandrino, tavola o montante 9, 9, 1, 1 = 81	In condizioni AUTO vedi schiacciamento 9, 9, 0, 1 = 0 In condizioni MANU vedi schiacciamento 9, 3, 1, 1 = 27	prEN 13128: velocità max traslazione quando gli elementi in movimento sono accessibili: 2m/min
Taglio	SI		SI		Sull'utensile 9, 9, 1, 1 = 81	In condizioni AUTO vedi schiacciamento 9, 9, 0, 1 = 0 In condizioni MANU vedi schiacciamento 1, 3, 1, 1 = 3	prEN 13128: velocità max rotazione tale che la rotazione si possa arrestare in non più di due giri
Taglio	SI		SI		Su bave di lavorazione 1, 3, 3, 1 = 9	Procedure di lavoro: obbligo di uso dei guanti 1, 3, 1, 1 = 3	
Impigliamento	SI		SI		Sull'utensile e sul mandrino durante il moto dell'utensile 9, 9, 1, 1 = 81	In condizioni AUTO vedi schiacciamento 9, 9, 0, 1 = 0 In condizioni MANU vedi schiacciamento 1, 3, 1, 1 = 3	prEN 13128: velocità max rotazione tale che la rotazione si possa arrestare in non più di due giri
Impigliamento	SI		SI		Sull'utensile e sul mandrino a macchina ferma 1, 3, 1, 1 = 3	Procedure di lavoro 1, 3, 1, 1 = 3	
Impigliamento	SI		SI		Sulle staffe 1, 1, 1, 1 = 1	Procedure di lavoro 1, 1, 1, 1 = 1	

Rischio	Presenza		Rischio residuo		Valutazione del rischio Indici G, P, Es, Ev = Cr	Soluzioni adottate Indici G, P, Es, Ev = Cr	Riferimenti e note
	SI	NO	SI	NO			
Impigliamento	SI		SI		Sul pezzo 1, 1, 1, 1 = 1	Procedure di lavoro 1, 1, 1, 1 = 1	
Trascinamento	SI		SI		Movimenti tavola (X) e montante (Z) 3, 9, 1, 1 = 27	In condizioni AUTO vedi schiacciamento 3, 9, 0, 1 = 0 In condizioni MANU vedi schiacciamento 3, 3, 1, 1 = 9	prEN 13128: velocità max traslazione quando gli elementi in movimento sono accessibili: 2m/min
Trascinamento	SI		SI		Rotazione utensile in prossimità di un elemento fisso (pezzo, montante, tavola ecc.) 9, 9, 1, 1 = 81	In condizioni AUTO vedi schiacciamento 9, 9, 0, 1 = 0 In condizioni MANU vedi schiacciamento 3, 3, 1, 1 = 9	prEN 13128: velocità max rotazione tale che la rotazione si possa arrestare in non più di due giri
Urto	SI		SI		Movimenti mandrino, tavola e montante 3, 9, 1, 1 = 27	In condizioni AUTO vedi schiacciamento 3, 9, 0, 1 = 0 In condizioni MANU vedi schiacciamento 1, 3, 1, 1 = 3	prEN 13128: velocità max traslazione quando gli elementi in movimento sono accessibili: 15m/min
Intrappolamento		NO	SI			Le protezioni possono comportare rischi di intrappolamento. Nelle protezioni è stata praticata una porta con la funzione di uscita di emergenza, dotata di maniglione antipanico. 3, 1, 1, 1 = 3	
Scivolamento, inciampo e caduta	SI			NO	Dalla tavola e dai soffiatti 3, 9, 1, 1 = 27	In condizioni AUTO vedi schiacciamento 3, 9, 0, 1 = 0 In condizioni MANU vedi schiacciamento 3, 3, 1, 1 = 9	
Proiezione di materiale solido	SI			NO	Per proiezione trucioli 3, 9, 3, 1 = 81	Vedi segregazioni in modalità AUTO 3, 9, 0, 1 = 0	EN 953 punti 5.5 e 5.6 e prEN 13128
Pericoli generati dalla non applicazione dei principi ergonomici sulla macchina:							

Rischio	Presenza		Rischio residuo		Valutazione del rischio Indici G, P, Es, Ev = Cr	Soluzioni adottate Indici G, P, Es, Ev = Cr	Riferimenti e note
	SI	NO	SI	NO			
Errori umani	SI		SI		È sempre possibile che la macchina venga attivata mentre vi sono persone in zone potenzialmente pericolose. 9, 1, 1, 3 = 27	È compito dell'operatore, secondo quanto indicato nel manuale, verificare che, all'avvio della macchina, nessuna persona si trovi all'interno della zona delimitata dalle protezioni. Inoltre chi dovesse trovarsi in tale zona ha a disposizione una o più uscite di emergenza a seconda dell'allestimento della macchina che dipende, a sua volta, dall'impianto in cui la macchina deve essere inserita. Le posizioni dei portelli di emergenza sono riportate nel manuale e nel layout allegati. Permane, comunque, un rischio residuoUNI 9, 1, 1, 1 = 9	
Errori umani	SI		SI		Proiezione di parti dell'utensile a seguito di errori nella gestione della pulsantiera e del controllo numerico, di verifica dei programmi CN ecc.. 9, 9, 1, 3 = 243	In condizioni AUTO vedi schiacciamento 9, 9, 0, 3 = 0 In condizioni MANU vedi schiacciamento 1, 1, 1, 3 = 3	Le protezioni sono realizzate secondo la EN 953 punti 5.5 e 5.6 e secondo il prEN 13128 appendice A con riferimento all'energia cinetica connessa con la proiezione del fresino
Pericoli causati da guasti all'alimentazione di energia, rotture di parti di macchina ed altri problemi funzionali:							
Proiezioni di parti di macchina o fluidi	SI			NO	Possibile proiezione di parti dell'utensile (fresino) a seguito di rottura dello stesso durante la lavorazione. 9, 9, 1, 3 = 243	Protezioni interbloccate quando la macchina lavora in modalità AUTO 9, 9, 0, 3 = 0	Le protezioni sono realizzate secondo la EN 953 punti 5.5 e 5.6 e secondo il prEN 13128 appendice A con riferimento all'energia cinetica connessa con la proiezione del fresino
Proiezioni di parti di macchina o fluidi	SI				Possibile proiezione dell'utensile se si sblocca a seguito della rottura della molla di ritegno. 9, ?, 1, 3 = ?	? Non potendo valutare la criticità non è possibile ottimizzare le protezioni	NB Non è possibile quantificare la probabilità di rottura senza una valutazione di affidabilità

Tabella II. Analisi dei Rischi

2.2 Analisi FMEA/FMECA

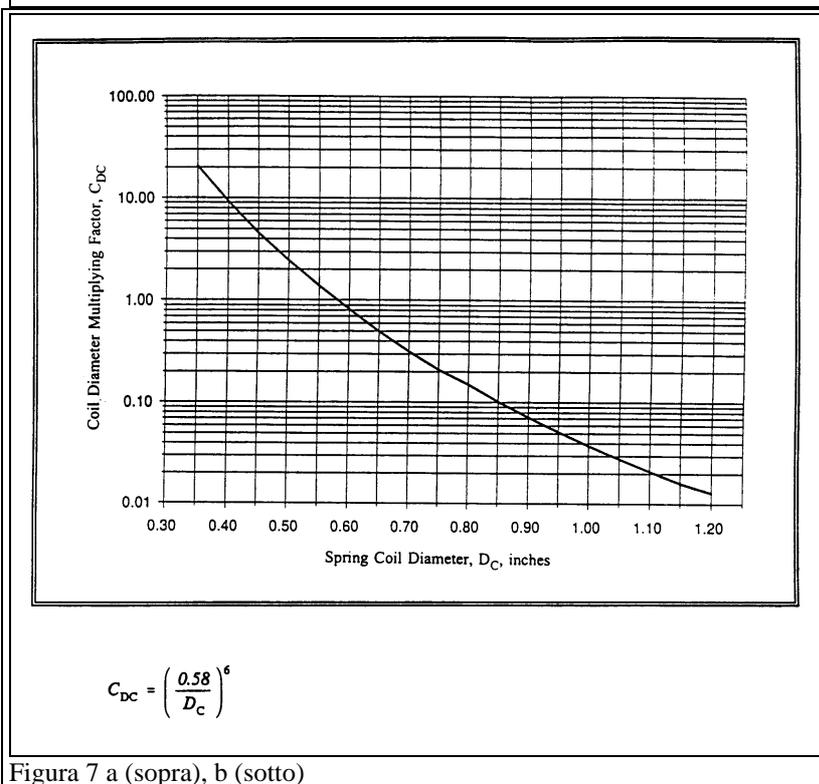
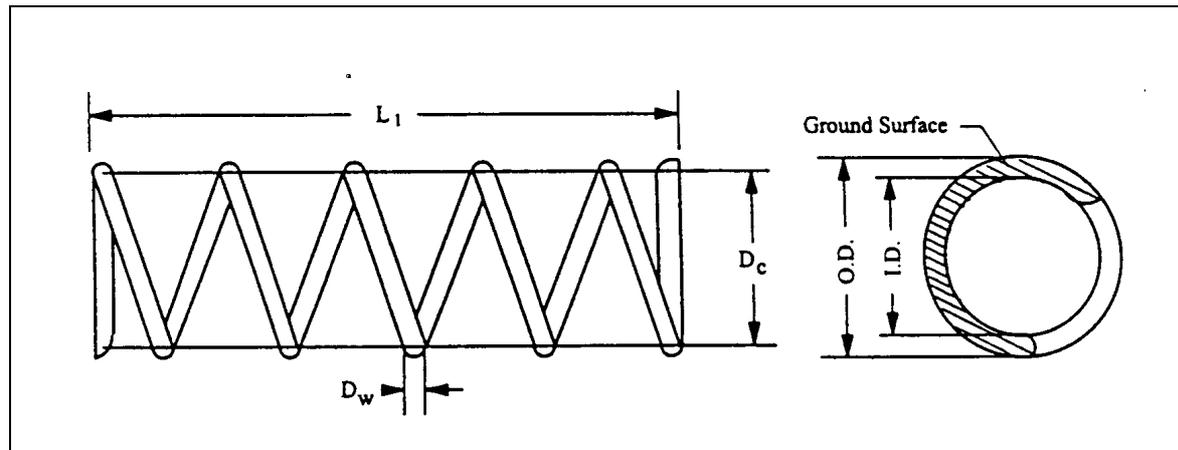


Figura 7 a (sopra), b (sotto)

L'Analisi dei Rischi del sistema ha evidenziato la necessità di ricorrere ad uno studio più approfondito in particolare del gruppo mandrino, in quanto questo è risultato essere il più critico per la Valutazione dei Rischi, poiché la sua affidabilità può interessare gli aspetti inerenti la sicurezza dell'intero sistema. Per tale approfondimento si è ricorso all'utilizzo di una metodologia affidabilistica di tipo induttivo FMEA/FMECA, esplicitamente richiamata nella EN 1050. Tale tecnica è volta alla ricerca ed all'analisi dei guasti relativi ad un determinato sistema e degli effetti, che questi possono produrre sul sistema stesso e sulle persone; è un'analisi sistematica di tutti i potenziali Modi di Guasto che valuta i punti di forza e di

debolezza del prodotto, nonché i problemi potenziali prima che questi si presentino. Lo scopo è quello di garantire che vengano intraprese tutte le azioni utili al raggiungimento degli obiettivi di qualità e di affidabilità richiesti, ovvero di minimizzare le probabilità di guasto del prodotto, individuando le parti critiche del progetto fin dalle prime fasi del suo sviluppo, cioè quando eventuali modifiche da effettuarsi richiederebbero costi e tempi senza dubbio minori rispetto a quelle eventualmente da eseguire sul prodotto finito.

Il riferimento principale è rappresentato dalla normativa MIL-STD-1629 che prevede, per la realizzazione della FMECA, il passaggio attraverso due stadi successivi: il primo passo è caratterizzato dalla FMEA, la quale consente di analizzare in modo sistematico i guasti, valutandone gli effetti prodotti e classificando questi ultimi in base alla loro gravità; il secondo stadio è invece rappresentato dalla FMECA, che partendo dalla classificazione realizzata con la FMEA, aggiunge dei dati sulla probabilità di guasto, al fine di quantificare la criticità del componente o della funzione.

Oggi, la FMECA, oltre ad essere utilizzata come uno degli strumenti più indicativi in campo affidabilistico, può risultare un valido supporto anche nello studio di problematiche relative alla sicurezza di varie tipologie di sistemi. Da questa prima analisi è emerso che è possibile ovviare a rischi quali proiezione di trucioli o parti di macchina, taglio, cesoiamento, schiacciamento etc. attraverso l'utilizzo di protezioni. In particolare, per quanto riguarda il rischio di proiezioni è emerso che la rottura della molla di supporto del

codolo dell'utensile può causare la proiezione dell'insieme fresa-codolo, aspetto quest'ultimo che influenza particolarmente la scelta delle protezioni da adottare. Perciò, per ottimizzare il progetto, evitando, quindi, un sovradimensionamento delle paratie, oppure interventi manutentivi da apportare su tale componente in numero superiore a quelli necessari a garantire la funzionalità e la sicurezza della macchina è stata studiata la reale possibilità di verificarsi del suddetto rischio. Un'analoga analisi è stata effettuata anche per il componente codolo, in quanto anche una sua rottura potrebbe essere causa del rischio sopra esaminato. Come esempio si riporta di seguito la sola analisi affidabilistica del componente molla attraverso l'analisi FMECA (figura 8) mediante il cosiddetto Indice di Criticità definito come:

$$I_c = \alpha \times \beta \times \lambda \times t \dots \dots (a)$$

dove:

- I_c è l'indice di criticità, ovvero il numero critico per ciascun Modo di Guasto;
- α è la probabilità di guasto (%) del componente imputabile ad un singolo Modo di Guasto;
- β è la probabilità di accadimento dell'effetto di guasto, associato al corrispondente modo di guasto. I valori di β vengono assegnati secondo la tabella riportata di seguito:

Effetto sicuro	$\beta = 1.00$
Effetto probabile	$0.01 < \beta < 1.00$
Effetto possibile	$0 < \beta \leq 0.01$
Nessun effetto	$\beta = 0$

- t è il tempo operativo in ore, cioè la durata in ore di una determinata fase operativa;
- λ è il tasso di guasto del componente o funzione, definito come numero di guasti ogni 1.000.000 ore o cicli di funzionamento.

Tale valore è stato ottenuto con il supporto di un software di matrice americana denominato RELEX [4], che calcola il tasso di guasto secondo la seguente formula [5]:

$$\lambda = \lambda_{base} \times \text{fattori correttivi}$$

dove:

- λ_{base} rappresenta un tasso di guasto di base derivante da test di laboratorio e presente nella banca dati del programma. Il tasso di guasto viene influenzato, come si vede dalla formula, da vari fattori correttivi, che, a loro volta, sono stati diagrammati in funzione dei parametri che possono incidere sull'affidabilità di ciascun componente (tempo, usura, fatica, erosione, lubrificazione, presenza di contaminanti, proprietà dei materiali, superfici di contatto, condizioni operative). In particolare per il calcolo del tasso di guasto della molla è stata utilizzata la seguente formula:

$$\lambda_{molla} = \lambda_{base} \times C_G \times C_{DW} \times C_{DC} \times C_N \times C_Y \times C_L \times C_K \times C_{CS} \times C_R \times C_M$$

Dove i fattori correttivi hanno il seguente significato:

- C_G = Fattore moltiplicativo che considera l'effetto della rigidità del materiale.
- C_{DW} = Fattore moltiplicativo che considera l'effetto del diametro del filo.
- C_{DC} = Fattore moltiplicativo che considera l'effetto del diametro della spira (figura 7 b).
- C_N = Fattore moltiplicativo che considera l'effetto del numero di spire attive.
- C_Y = Fattore moltiplicativo che considera l'effetto della resistenza a trazione del materiale.
- C_L = Fattore moltiplicativo che considera l'effetto della deflessione della molla.
- C_K = Fattore moltiplicativo che tiene conto di un fattore di maggiorazione dovuto alla sollecitazione aggiuntiva a cui è soggetta la molla a causa dello sforzo di taglio e dell'effetto "trave curva".
- C_{CS} = Fattore moltiplicativo che considera il tasso del ciclo della molla (cicli/min).

In funzione delle specifiche tecniche e di funzionamento della molla è stato ottenuto un valore del tasso di guasto pari a $\lambda_{molla} = 0.069$ guasti/ 10^6 cicli (considerando 1 ciclo ogni ora).

Inoltre, per il calcolo dell'Indice di Criticità sono stati associati ai parametri della formula (a) i seguenti valori:

- $t = 16000$ cicli, basato sull'ipotesi che il cambio utensile sia effettuato 1 volta ogni ora considerando che il tempo operativo della macchina sia di 16000 ore ($8h \times 200gg \times 10aa$);
- $\alpha = 1$, in quanto esiste un solo modo di guasto (rottura della molla) che può provocare la proiezione della fresa e del codolo;

Componente	Modi di guasto	Causa	Effetti		Gravità	Azioni intraprese e Note
			Locali	Sistema		
Molla	Rottura a fatica dovuta al montaggio e smontaggio	Difettosità di lavorazione	La molla non garantisce più il bloccaggio del codolo dell'utensile	Proiezione di fresa e codolo	Catastr.	Segregazione globale della macchina mediante pannellature in lamiera metallica dotate di finestrate in policarbonato antisfondamento (UNI EN 292/1, UNI EN 292/2, UNI EN 1088). Scelta dei materiali delle protezioni in base al prEN 13128 ed alla norma EN953. Nota Le paratie adottate potrebbero non essere sufficienti a garantire l'incolumità dell'operatore nei pressi della macchina nel caso di proiezione di fresa e codolo. Risulta necessaria l'analisi affidabilistica del componente per verificare la reale necessità di adottare protezioni più robuste o eventualmente per pianificare interventi manutentivi più frequenti.
Cuscinetti a rulli conici per il supporto dell'albero portautensile	Grippaggio	Difettosità di Mancanza di lubrificazione. Ossidazione. Corpi estranei introdotti durante il montaggio o la manutenzione. Surriscaldamento	Possibile gioco e ciottolamento dell'albero con l'innescarsi di pericolosi fenomeni vibratorii.	Possibile rottura e proiezione del fresino imputabile a sovraccarichi e vibrazioni	Catastr.	Segregazione globale della macchina mediante pannellature in lamiera metallica dotate di finestrate in policarbonato antisfondamento. Nota Non è richiesta pertanto un'analisi approfondita dell'affidabilità di tali componenti in quanto le paratie adottate sono state progettate per scongiurare il rischio di proiezione della fresa.
Codolo dell'utensile	Rottura	Difettosità. (presenza di cricche) che in corrispondenza delle variazioni di sezione del codolo possono innescare rotture per fatica	Il codolo non risulta più vincolato assialmente	Proiezione di fresa e codolo	Catastr.	Vedi molla

Figura 8 – Analisi FMEA del gruppo mandrino

$\beta = 0.5$, in quanto, in base ad informazioni ricavate da esperti operatori del settore, si può ritenere che esista una certa probabilità che a seguito della rottura della molla di bloccaggio dell'utensile si verifichi la proiezione del codolo più fresa.

Pertanto, in base alle considerazioni fatte, si ottiene un valore dell'Indice di Criticità pari a

$$I_c = 552 \text{ per missione,}$$

che dimostra (tenendo conto che tale valore va moltiplicato per 10^{-6}) che la criticità e, quindi, la sicurezza del sistema in questione è accettabile nel caso esaminato.

I risultati dell'analisi hanno dimostrato che i componenti meccanici critici in ottica sicurezza (codolo e molla) si trovano ad operare con un'affidabilità molto elevata tale da non richiedere un rinforzo ulteriore delle barriere protettive utilizzate o la sostituzione delle stesse. Comunque, pur risultando la macchina estremamente sicura, per migliorarne ulteriormente tale aspetto (al fine, anche, di aumentare gli intervalli periodici di manutenzione sul mandrino) si potrebbe intervenire, ad esempio, sul componente molla con particolari accorgimenti progettuali. In particolare, il progettista potrebbe, aumentare il diametro della spira della molla ottenendo, come si può osservare dalla figura 7.b, una diminuzione del parametro C_{DC} , indice dell'influenza del suddetto fattore sul tasso di guasto del componente. Oppure, come ulteriori soluzioni si potrebbero considerare o un aumento delle spire attive oppure la riduzione del diametro del filo della molla (compatibilmente con il materiale utilizzato) che, dall'analisi di dati sperimentali riportati su grafici analoghi al precedente, comporterebbero una diminuzione dei valori dei parametri ad essi associati (rispettivamente C_N e C_{DW}) e conseguentemente un miglioramento in termini affidabilistici del componente in questione.

2.3 Scelta delle protezioni

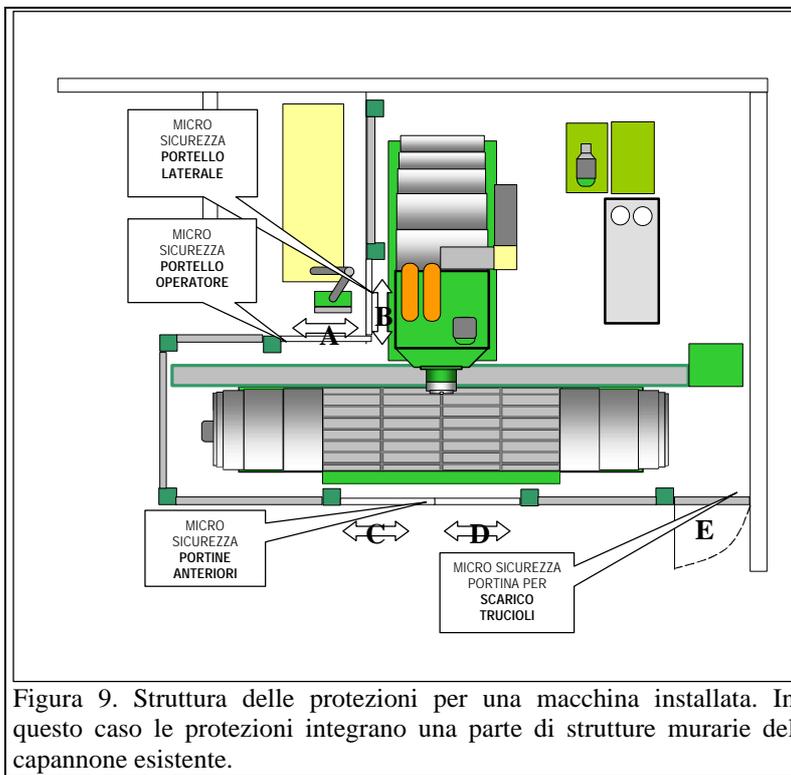


Figura 9. Struttura delle protezioni per una macchina installata. In questo caso le protezioni integrano una parte di strutture murarie del capannone esistente.

Sulla base dei risultati del *benchmarking*, la scelta delle protezioni si è orientata su una segregazione globale della macchina mediante pannellature in lamiera metallica dotate di finestre in policarbonato antifondamento per il controllo della lavorazione in corso. In tali protezioni sono stati ricavati tre portelli, uno presso la posizione di lavoro dell'operatore, uno di fronte alla tavola per il carico e uno laterale per l'accesso alla zona degli ausiliari e dell'evacuatore di trucioli (quest'ultimo con la funzione di uscita di emergenza). Quindi i primi due portelli, durante il funzionamento in AUTO, sono bloccati, mentre il terzo può essere aperto sia dall'interno, con un maniglione antipánico, che dall'esterno, apertura che, però, causa un arresto di emergenza. Pulsanti di arresto di emergenza sono stati posti presso ognuno dei portelli e, in caso di arresto di emergenza, i portelli bloccati possono essere sbloccati solo con un apposito pulsante posto accanto a quello di arresto di emergenza.

I portelli e i sistemi di interblocco sono stati progettati seguendo le norme UNI EN 292/1, UNI EN 292/2 e UNI EN 1088 e i materiali con cui sono state realizzate le protezioni sono stati scelti seguendo le indicazioni del prEN 13128 e della norma EN 953.

Nella figura 9 è mostrato il layout della macchina protetta come descritto in un caso specifico in cui parte della protezione è stata integrata da strutture murarie preesistenti in azienda.

Nella figura 9 è mostrato il layout della macchina protetta come descritto in un caso specifico in cui parte della protezione è stata integrata da strutture murarie preesistenti in azienda.

3 CONCLUSIONI

Dall'applicazione analizzata emerge che, senza l'ausilio di opportuni strumenti di approfondimento (come in questo caso la FMEA/FMECA), gli interventi che il progettista avrebbe potuto introdurre in base a quanto individuato dall'Analisi dei Rischi potrebbero portare a sovradimensionare parte della componentistica in oggetto. Pertanto, dopo una prima analisi qualitativa dei problemi e dei rischi relativi alla macchina (Analisi e Valutazione dei Rischi e conseguenti suggerimenti), è risultato necessario studiare i comportamenti affidabilistici di quei componenti il cui funzionamento è strettamente collegato alla sicurezza delle macchine. Questo studio specifico e dettagliato è stato ovviamente eseguito solamente su quei componenti su cui è stato necessario approfondire la nostra conoscenza. Dunque, la scelta conclusiva delle soluzioni progettuali ottimali per la macchina in questione è nata dall'integrazione degli studi ed informazioni ricavate che hanno permesso di progettare i più idonei sistemi di protezione. Non si deve, però, dimenticare che in generale, una protezione volta a eliminare o ridurre un determinato rischio, potrebbe essere, se considerata rispetto alla macchina nell'insieme, fonte di rischi aggiuntivi.

Da quanto visto emerge come, anche per una macchina ben conosciuta e di media complessità, una stima completa e attendibile dell'effettivo livello di sicurezza della macchina possa richiedere l'impiego di metodologie di approfondimento anche complesse. D'altronde, se le PMI vogliono mantenersi al livello della concorrenza straniera l'utilizzo della progettazione integrata della sicurezza (*Design for Safety*) della macchina diventa, oggi, quasi obbligatorio alla luce delle normative vigenti in materia.

4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Arcidiacono, G., "Nuove procedure di progettazione di sistemi meccanici nell'ambito del *Design for Safety* a fronte delle normative vigenti", Tesi Dottorato di Ricerca, Febbraio 1998
- [2] Arcidiacono, G., Citti, P., Mazzeranghi, A., Spinelli, L., "Guida alla sicurezza delle macchine: il D.P.R. 459/96 Direttiva Macchine", Nuovo Studio Tecna ed., Roma, 1997
- [3] Beretta, S., Capitani, R., Citti, P., Paolini, G., "Qualità, Affidabilità e Sicurezza delle costruzioni meccaniche, CUSL ed., Firenze, 1998
- [4] Handbook "RELEX", Relex Software Corporation, (1997)
- [5] Ireson W. G., Coombs C. F., Moss R. Y., "Handbook of Reliability Engineering and Management", Mc Graw-Hill, 1996
- [6] Mazzeranghi, A., Qualità & Sicurezza: approcci e strumenti metodologici per la garanzia della sicurezza delle macchine" monografia supplemento a De Qualitate, Nuovo Studio Tecna ed., Roma, allegato al n. 11 del Dicembre 1997
- [7] Mazzeranghi, A., Spinelli, L., con introduzione del prof. P. Citti, " Sicurezza & Marcatura CE", monografia in corso di pubblicazione come allegato a De Qualitate, Nuovo Studio Tecna ed., Roma, Settembre 1998
- [8] Oddo, A., Petriga Nicolosi, N., "La nuova legislazione per la sicurezza delle macchine", d. TNE, Torino, Dicembre 1996
- [9] Operations Research Analysis Department, "Handbook of Reliability Prediction - Procedures for Mechanical Equipment", 1994
- [10] "Safety of machinery – Risk assessment", EN 1050, 1997
- [11] UCIMU - Direzione tecnica, "La Direttiva Macchine", Ed. TNE, Torino, Settembre 1996
- [12] UNI EN 292, "Concetti fondamentali, principi generali di progettazione. Terminologia, metodologia di base", UNI 1992