

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Meccanica



Sistema automatico di distribuzione ottimizzata di polvere per verniciatura

RELATORE
Prof. Francesco Braghin

TESI DI LAUREA DI

Francesco Rinaldi
Matr. N. 740098

Anno Accademico [2011/2012]

Indice

1	La verniciatura a polvere	1
1.1	Cos'è una vernice in polvere	1
1.2	Perchè verniciare in polvere	4
1.3	Le tecnologie nell'applicazione della polvere	6
1.3.1	Verniciatura a letto fluido	6
1.3.2	Verniciatura a fiamma- spruzzo	7
1.3.3	Verniciatura elettrostatica a spruzzo	7
1.3.4	Nuovi sistemi d'applicazione	10
1.4	Le componenti di un impianto di applicazione	11
1.4.1	cabina polveri	12
1.4.2	cabina di verniciatura	13
1.4.3	Ciclone	14
1.4.4	Depolveratore	15
1.5	La verniciatura a polvere UV	16
2	L'innovazione nell'applicazione	19
2.1	I portoni sezionali	19
2.2	sistema di movimentazione	21
2.2.1	Il nastro trasportatore	23
2.3	Il reciprocatore	25
2.4	la cabina di verniciatura	27
2.5	La pistola corona	28
2.6	Gestione elettronica	30
2.6.1	IL PLC	30
2.6.2	L'inverter	31
3	Ottimizzazione	35
3.1	Anova	37
3.2	Regressione lineare	39
3.3	Parametri, vincoli ed obiettivi	41
3.4	Problematiche della verniciatura elettrostatica	43

3.4.1	repulsione del primo strato di vernice e densità di distribuzione della granulometria	44
3.4.2	Back-ionization	44
3.4.3	Accumulo sui bordi e Gabbia di Faraday	45
3.5	Controllo parametri Opti-Star, le prime regolazioni	46
3.5.1	Carica dell'elettrodo	47
3.5.2	Quantità di polvere erogata	48
3.6	Le misure	51
3.6.1	Gli strumenti di misura	52
3.6.2	Cambio colore e percentuale-polvere	54
3.6.3	Velocità e campo d'azione della pistola	59
3.6.4	Taratura per installazioni future	63
	Conclusioni	65
	A Dati ANOVA a 2 fattori	67
	B Anova a 2 fattori senza Canon	73
	C Risultati regressione negativi a 30% di polvere	75

Elenco delle figure

1.1	schema del caricamento elettrostatico in una canna di una pistola triboelettrica. A teflon; B particella di polvere.	8
1.2	esempio di ugello a dita	8
1.3	Schema di una pistola ad effetto corona	9
1.4	particella neutra all'interno di un campo elettrico	9
1.5	Particella carica elettricamente immersa in un campo elettrico	10
1.6	schema del sistema a spazzola elettromagnetica	10
1.7	Particella-trasporto	11
1.8	Tipico impianto di verniciatura a polvere	12
1.9	Esempio i installazione di cabina in PVC con fondo autopulente.	14
1.10	Principio di funzionamento di un ciclone	15
2.1	Portone sezionale simiaperto	20
2.2	Pannello sandwich	20
2.3	Foto del lato corto del pannello	21
2.4	Trasportatore vertiacale monorotaia	21
2.5	Trasportatore meccanico. A sinistra il prototipo, a destra la versione per il cliente in Francia	23
2.6	Motore e riduttore del nastro trasportatore	24
2.7	Particolare battute in PVC	24
2.8	Sistema a cinghia trapezoidale. a:sensore di prossimità; b:cinghia; c:carrello	26
2.9	Legge di moto ad accelerazione costante tagliata	26
2.10	Motore del reciprocatore. È ben visibile il cuscinetto a cui è agganciata la puleggia	27
2.11	Piattelli di fissaggio cinghia su carrello	27
2.12	Cabine di verniciatura. A:cabina del prototipo; B:cabina per il cliente	28
2.13	lato posteriore dell'unità di controllo Opti-Star	29
2.14	Connettore di alimentazione e di accensione remota	31
2.15	Sistema di uscite del PLC	31
2.16	I collegamenti di un inverter	32
2.17	L'inverter	33

2.18	Logica di controllo digitale per ottenere diverse frequenze	33
3.1	Distribuzione di Fisher con un esempio di test d'ipotesi	39
3.2	Retta di regressione lineare semplice	40
3.3	Forze che influenzano un particella di polvere carica	43
3.4	back-ionization	45
3.5	Linee di campo di un pannello sono l'effetto di pistola corona	45
3.6	Effetto della gabbia di Faraday e cavità non raggiunta dalla vernice .	46
3.7	Immagine frontale dell'unità di comando Opti-Star CG07	47
3.8	Curva caratteristica della pistola Corona utilizzata.	47
3.9	Relazione tra l'efficienza di trasferimento (in percentuale polvere che ha aderito al pezzo rispetto alla totale erogata) e la corrente della pistola	48
3.10	Effetto venturi generato da un flusso d'aria accelerato	49
3.11	Unità venturi della ITWGema. A unità completa. B unità vista in sezione	49
3.12	Grafico dell'andamento dell'aria di convogliamento (linea continua) e dell'aria di supporto (linea tratteggiata) al variare della regolazione digitale sulla percentuale-polvere. $C_0 = 1,8m^3/h$; $C_1 = 100\%$; $P_9 = 0m^3/h$	50
3.13	Spessimetro per vernici. Sono visibili i due sensori per substrati ferrosi e non ferrosi	52
3.14	Sistema di lettura di uno spessimetro a induzione magnetica	52
3.15	Parte di pannello segnata con nastro adesivo per delimitare la zona di misura.	54
3.16	Interaction plot per percentuale-polvere e tipo polvere	55
3.17	Test di normalità. Ipotesi nulla di normalità accettata per $\alpha = 5\%$. .	56
3.18	Test di omoschedasticità di Levene superato.	56
3.19	Plot dei residui in ordine temporale di osservazione per evidenziarne eventuale influenza.	57
3.20	Interaction plot. sulle ordinate lo spessore e sull'ascissa il peso specifico; perc.-polvere segnata sulle linee	58
3.21	Traiettorie coperte da uno spruzzo di polvere elettrostatica	59
3.22	Grafico <i>spessore</i> su <i>velocità</i>	61
3.23	Dati sperimentali distribuzione polvere	62
3.24	Distribuzione polvere ricavata dall'Università Fraunhofer	62
3.25	Bilancia infinitesimale	63

Elenco delle tabelle

1.1	componenti delle polveri per verniciatura	3
2.1	caratteristiche elettriche unità Opit-Star	30
2.2	aratteristiche sistema pneumatico	30
3.1	tabella riassuntiva delle devianze, gdl e varianze utili al calcolo ANOVA.	39
3.2	Impostazione valori Opti-Star	51
3.3	Fattori e relativi livelli scelti	55
3.4	Risultati ANOVA a due fattori. È stata calcolata anche l'interazione .	55
3.5	Peso specifico delle polveri utilizzate	57
3.6	Risultati Regressione	58
3.7	Risultati della regressione con il fattore velocità	61
3.8	Classificazione dei parametri	64
3.9	Tabella consumi energetici	66
A.1	Dati Anova	67
B.1	Risultati Anova	73

Sommario

Il settore della verniciatura a polvere ha subito sempre forti incrementi fin dagli anni sessanta fino alla fine del XX secolo ([1]) grazie ai numerosi vantaggi rispetto alla più classica verniciatura liquida. Uno fra questi è stato anche la facile automatizzazione del processo oltre che la possibilità di annullare nella quasi totalità gli sprechi grazie al semplice recupero dell'over-spray (meno efficiente e molto complesso in quella liquida). La limitazione al mercato dei metalli, però, ne ha arrestato la diffusione: le temperature di 180°, 200°C normalmente raggiunte per la polimerizzazione delle polveri escludono di fatto la possibilità di trattare materiali termosensibili.

Con l'introduzione delle polveri in poliestere che polimerizzano sotto radiazione UV e non mediante calore, è stato possibile abbassare le temperature di esercizio, compiendo il primo passo verso nuove prospettive. Questo nuovo processo a temperature inferiori ai 90°C, presenta nuove e diverse problematiche che non ne hanno permesso, ancora oggi, la diffusione sperata. Una fra queste, qui presentata, è la necessità di una molto più accurata distribuzione della polvere sui manufatti, non attuabile con gli attuali reciprocatori automatici. È infatti importante garantire bassi spessori di polvere depositata in quanto i raggi UV non riescono a penetrare in profondità, inoltre gli spigoli dei manufatti sono pericolosi punti di accumulo conseguenza del campo elettrico generato.

L'evoluzione raggiunta dai sistemi automatici per verniciatura, qui descritta, permette anche una maggior elasticità del processo a favore di piccoli lotti di produzione e numerosi cambi colore. L'attenta distribuzione della polvere ha consentito una sensibile riduzione dell'over-spray rendendo possibile l'eliminazione dei sistemi di recupero, causa di cospicuo spreco di tempo ad ogni cambio colore.

Il sistema automatico qui descritto vuol' essere uno dei molteplici strumenti a favore del successo del processo a verniciatura a polvere UV, affiancandone la diffusione, ma può rappresentare anche un puro progresso degli attuali sistemi automatici per polveri tradizionali, potendosi delineare come il futuro sostituto.

Parole chiave: verniciatura, polvere, applicazione, ottimizzazione, recupero, automatico.

Abstract

The field of powder coating grows up during the '60 until the end of the XX century ([1]) due to many advantages more than the liquid painting. One of these was the easy automation of the process and the possibility to erase the waste due to the easy over-spray recovery (too difficult with the liquid one). However the limitation to the metals market has arrested the diffusion: 180°-200°C temperatures are normally achieved for the powders polymerization and exclude the possibility of treating heat-sensitive materials.

After the introduction of polyester powders, which polymerizes under UV irradiation (not with heating), new opportunities has become possible. In other hand, at temperatures below 90°C, this new process presents new and different problems that don't allow, even today, the hoped widespread. Among these difficulties, there is the need for a much more accurate powder's distribution on the workpiece, that it isn't carried out with current automatic reciprocators. Since UV rays can not penetrate in depth, it's important to ensure low powder thickness. Moreover, the edges the edges of the workpiece are dangerous points of accumulation, caused by the generated electric field.

It is described here the evolution of the automated system for powder deposition that allows greater flexibility of the process in favor of small production lots and numerous color changes. The accurate powder distribution has allowed a considerable reduction of the over-spray; this makes possible the elimination of recovery systems, due to considerable waste of time at each color change.

The automatic system, described herein, means to be one of many tools to support the success of the UV-powder coating system. However it can also be a pure progress of current automated powder systems then may become its real substitute.

Key word: coating, powder, deposition, optimization, recovery, automatic.

Capitolo 1

La verniciatura a polvere

Il primo concetto di verniciatura a polvere lo si può far risalire agli anni '50, quando negli Stati Uniti fu usato per qualche applicazione nel campo dell'isolamento di componenti elettrici.

È dagli anni sessanta però che ci sono state considerevoli evoluzioni tecnologiche che ne hanno accelerato la diffusione. Lo sviluppo in contemporanea di resine termoindurenti e termoplastiche che avessero adeguate capacità elettrostatiche e di adesione al metallo permise di sintetizzare polveri sempre più vantaggiose rispetto alla classica verniciatura liquida.

Le caratteristiche di durabilità e resistenza ne permisero la totale diffusione per il rivestimento di tubazioni o protezione di strutture da esterno in genere, oltre che l'affermazione come isolante per componenti elettriche. È in Europa però che agli inizi degli anni '70 si colse per prima l'opportunità di usare la verniciatura a polvere anche per fini estetici in alternativa ai cicli a solvente. Dal 1970-80 le vernici a polvere sono state introdotte anche nei settori dell'edilizia (profili in alluminio ecc.) e degli elettrodomestici, che utilizzano polvere a basso spessore e a cicli misti (primer liquidi più polveri come mano a finire).

L'espansione di questo nuovo tipo di processo per verniciatura ha subito un'accelerazione con l'introduzione di resine termoindurenti che polimerizzavano a 180°C circa proseguendo fino agli ultimi decenni del secolo scorso grazie alle sue uniche qualità: essere il più economico ed ecologico sistema per verniciatura di metalli in generale ([1]).

1.1 Cos'è una vernice in polvere

Le vernici in polvere sono prodotti organici sotto forma di polvere; diversamente dalle vernici liquide, nella singola particella è compresa l'intera formulazione che comprende resine, pigmenti e altri additivi. Caratteristica più di rilievo è che queste vernici non contengono solventi.

È importante sottolineare che esistono polveri di natura molto diversa. Per ogni applicazione specifica si deve scegliere il prodotto che dà il miglior risultato secondo l'obiettivo finale ricercato:

- rivestimento di protezione: resistenza alla corrosione, atmosferica o chimica (atmosfera marina, solventi, soluzioni acide o basiche);
- isolamento elettrico o termico : le plastiche in generale sono ottimi isolanti e possiedono un'eccellente tenuta alle basse temperature; rivestimento estetico : possibilità di ottenere superfici lisce e brillanti con numerosi colori;
- rivestimento alimentare : alcune plastiche rispondono alle norme in vigore e possono essere utilizzate dall'industria alimentare o farmaceutica (plastificazione dell'interno di scatole, di imballi metallici , ecc...).

Una macro classificazione delle polveri le raggruppa in due famiglie:

- le termoindurenti (polimerizzano quando è applicato sufficiente calore);
- le termoplastiche (fluidificano quando è applicato il calore e non modificano la loro composizione chimica quando tornano solide per raffreddamento).

Le termoindurenti rappresentano il 90% del mercato mondiale per diversi vantaggi; hanno migliori caratteristiche di resistenza chimica e meccanica, oltre l'enorme vantaggio di essere fragili. Quest'ultimo aspetto permette infatti facile lavorazione meccanica contro invece le tenaci termoplastiche per cui si è obbligati a seguire precise accortezze quali raffreddamento continuo dei macchinari o addirittura l'utilizzo di ghiaccio secco.

Le resine più comuni delle polveri termoplastiche sono: polietilene, polipropilene, nylon, polivinilcloruro, polivinilidenecloruro, poliammidi, poliestere termoplastici. Sono comunque resine usate quando siano necessari film spessi ed eccezionali performance di resistenza. Le polveri più diffuse come prima spiegato sono però le termoindurenti, per cui si lascia una più precisa descrizione:

- le resine epossidiche. Hanno buone proprietà meccaniche, adesione e resistenza alla corrosione e agenti chimici, ma presentano una scarsa durabilità in esterno. Utilizzate per decorazione (mobili, scaffalature e apparecchi diversi) e protezione (tubazioni di grosso diametro, fondi e sottosmalti automobilistici), rappresentano le più diffuse e più variegate ma sono sensibili ai raggi UV, sotto i quali, sfarinano;
- resine poliestere. Sono i prodotti d'elezione per l'applicazione su elementi di finitura esterni perché hanno una buona resistenza ai raggi UV. Per tradizione, un'altissima resistenza agli agenti atmosferici esterni era la peculiarità degli acrilici, ma i recenti sviluppi della tecnologia dei poliesteri permettono a questa

classe di prodotti di offrire una resistenza pari ad almeno 5 anni di esposizione in Florida. I poliesteri offrono una buona resistenza alla corrosione su un adeguato strato di pretrattamento, ma non allo stesso livello delle epossidiche. Usate per profili di alluminio da infissi, mobili da esterno, macchinari per fattorie, pali da recinzione e apparecchiature per condizionamento;

- resine ibride epossidiche/poliestere. Sono meno “fragili” agli effetti dei raggi UV delle epossidiche ma non quanto le poliesteri. Sono meno dure e più sensibili ai solventi ed ai metalli delle epossidiche. Si adattano bene ai supporti metallici e non è necessario un primer (trattamento di fondo) per l'applicazione elettrostatica. Applicazioni sono i boiler, gli estintori, radiatori, mobili da giardino e biciclette

Tutte le polveri presentano sostanzialmente una tipica composizione: per metà, 50% 60% del mix, sono presenti leganti, resine e indurenti, per la restante parte si usano pigmenti e cariche, mentre additivi generici possono esser presenti al 1% o 2%.

Tabella 1.1: componenti delle polveri per verniciatura

Componente	Funzione
LEGANTE	è il componente base del film con funzioni di protezione e adesione
PIGMENTI	forniscono colore e ricoprimento, hanno funzione protettiva (barriere sacrificali)
CARICHE	utilizzati come riempitivi, effetto coprente ed opacizzante
ADDITIVI	presenti in piccole quantità con innumerevoli funzioni (catalisi, bagnamento, distensione)

In fase di realizzazione tutti questi componenti vengono attentamente pesati e uniti tra loro in un grande miscelatore, attenti nel creare un composto, il più omogeneo possibile. Il procedimento è identico a quello delle vernici liquide ma con la grossa differenza che la tonalità e le altre caratteristiche della polvere finita vengono determinate in questa fase quindi la miscela deve essere assolutamente esatta. Si effettuano continui controlli a campione e le regolazioni necessarie vengono controllate da elaboratori elettronici al fine di ottenere fin da subito la giusta composizione senza eccessive e costose regolazioni.

La produzione della polvere si avvale di altri due passaggi: l'estrusione a caldo con successivo repentino raffreddamento e la triturazione. Subito dopo la miscelazione, la resina così ottenuta viene fatta passare a caldo (circa 130°C) attraverso due coclee. il risultato è un sottile ed omogeneo nastro fluido che viene subito portato a temperatura ambiente mediante rulli raffreddati ad acqua onde evitare che la resina polimerizzi. Al termine del trasportatore, il nastro è ormai solidificato ed è fragile, quindi viene ridotto in granuli pronto per la macinazione. Quest'ultima rappresenta

un'altra fase delicata in cui si definisce la granulometria della polvere finita. Affinché l'operazione abbia successo, viene introdotta dell'aria compressa che fa salire la polvere nella parte alta del macinatore dove è presente un sistema centrifugo ("classificatore") che permette la fuoriuscita solo di granulometrie di precisa dimensione. La curva di distribuzione normale della granulometria viene controllata agendo sui parametri di velocità del "classificatore" e di portata d'aria e talvolta si aggiunge un secondo "classificatore" per eliminare polveri ancora troppo sottili.

1.2 Perché verniciare in polvere

La verniciatura a polvere ha rappresentato una svolta dalla classica verniciatura liquida per numerosi aspetti. Fra i più importanti c'è sicuramente la totale eliminazione dei solventi, non solo costosi e di difficile smaltimento ma anche estremamente pericolosi e dannosi per l'ambiente. Nei classici sistemi a verniciatura a liquido si rende necessario l'utilizzo di stanze ermetiche il cui ricambio d'aria è tenuto estremamente sotto controllo mediante filtri ai carboni attivi o addirittura anche post-combustori. Anche per la verniciatura a polvere si fa uso di cabine ma la cui utilità è solo quella di evitare la caduta di sporcizia, sono più piccole, senza filtri e permettono il recupero dell'over-spray (parte di prodotto che non ha aderito al manufatto) con sprechi minimi. La stessa automatizzazione del processo è più semplice in quanto, sfruttando la carica elettrostatica, si riesce a distribuire la polvere sul manufatto più facilmente e senza il rischio di gocciolamenti oltre il vantaggio che, con una sola passata, si ottiene un risultato di ottima durezza e resistenza.

Riassumendo, i vantaggi dell'utilizzo della polvere sono:

economici ed ambientali

- utilizzo al 95% 98% del prodotto;
- basta un solo passaggio di verniciatura;
- minori costi di smaltimento;
- minori spese di manutenzione (non si presentano problemi di imbrattamento);
- non ci sono perdite perché la polvere ha un residuo secco del 100%;
- riduzione scarti per difetti di lavorazione;
- eliminazione di sostanze volatili;

migliori condizioni di lavoro

- maggior sicurezza dell'ambiente di lavoro (il prodotto non è infiammabile);

- migliore igiene (semplice pulizia con aria compressa);

semplificazione del lavoro

- tecnica di applicazione semplice senza rischio di gocciolamenti;

qualità dei prodotti finiti

- maggiore durezza e resistenza alle alte temperature;
- estetica di maggior durata.

Di contro questo tipo di processo è limitato dalle temperature necessarie alla polimerizzazione delle polveri termoindurenti. Possiamo infatti dividere il procedimento in due fasi, la fusione a 80° 90°C che permette lo scioglimento e l'amalgama dei granelli di polvere, e la polimerizzazione a 180° 200°C che ne garantisce l'indurimento e la tenuta. Questo secondo passaggio è il vero ostacolo che limita questo tipo di verniciatura a manufatti non termosensibili. La possibilità di abbassare la temperatura di reticolazione è possibile aumentando la percentuale di catalizzatori ma questo causa una pericolosa interferenza delle due fasi: la formazione anticipata di cristalli interferisce con la fase di fusione e fluidificazione, bloccandone il corretto avanzamento. L'unica soluzione che si presenta è quella di mantenere le due fasi separate ([1]): ottenendo la fusione con riscaldamento e la polimerizzazione successivamente mediante fotoiniziatori sensibili a radiazioni ultraviolette. Questo procedimento non ha avuto ancor oggi però il successo sperato a causa di aggiuntive problematiche di cui meglio si tratterà nel paragrafo 1.5.

Anche altri settori come la verniciatura di coil e latta, nonostante le alte temperature di polimerizzazione non rappresentino un problema, non hanno visto la totale conversione al sistema a polvere. La limitazione è la capacità produttiva, infatti la velocità lineare di avanzamento è insufficiente: 100m/min per la classica verniciatura a solventi contro i 15m/min di quella a polvere([1]). La tecnologia oggi utilizzata è quella delle pistole a spray elettrostatiche che sfruttano sostanzialmente due forze, quella elettrica e quella aerodinamica. Quest'ultima, effettuata mediante un flusso d'aria compressa è il principale ostacolo per le alte velocità produttive in quanto un aumento eccessivo della portata d'aria supererebbe la forza di attrazione elettrostatica polvere-pezzo, non permettendone quindi l'attacco. Sacchi [3] riporta che gli impianti di verniciatura a polvere per coil, hanno un break even di 600.000m²/anno di superfici verniciate alla velocità lineare di 10m/min contro un break even di almeno 10 volte tanto per impianti a solvente liquido che raggiungono velocità lineari di quasi 100m/min. Questo risulta molto incoraggiante per il settore che continuerà sicuramente ad evolversi.

1.3 Le tecnologie nell'applicazione della polvere

Per qualsiasi tipo di verniciatura, che sia a polvere o liquida, bisogna seguire precisi passaggi riassumibili in questi 3 punti:

- preparazione delle superfici;
- applicazione del prodotto verniciante;
- essiccamento o fusione e polimerizzazione (in forni a convezione forzata e radiazioni UV);

e questo indipendentemente dalla natura dell'oggetto.

La fase di applicazione avviene quindi solo dopo un procedimento lungo e costoso in cui sostanzialmente si effettua una pulizia da sostanze polverulenti, da olio, grassi e possibili ossidazioni superficiali del materiale nonché rendendolo più poroso per garantire una miglior aderenza della vernice. Le tecniche adoperate nel settore della polvere, ad oggi limitato ai metalli, sono quelle di una sequenza di bagni chimici.

Il prodotto così ottenuto subisce spesso un ulteriore decapaggio meccanico prima di passare alla fase di applicazione ma è solo un'accortezza necessaria per eliminare del possibile grasso dovuto ad un eccessivo maneggiamento o stoccaggio in condizioni non idonee.

L'applicazione delle vernici in polvere negli ultimi trent'anni ha visto svilupparsi sostanzialmente tre tecniche:

- Verniciatura a letto fluido, elettrostatica e non;
- verniciatura a fiamma- spruzzo;
- verniciatura elettrostatica a spruzzo per mezzo di pistole;

oltre il presentarsi di nuovi sistemi limitati al settore dei coil quali quello a spazzola elettromagnetica

1.3.1 Verniciatura a letto fluido

Storicamente è il primo metodo di applicazione delle polveri utilizzato industrialmente. I pezzi da verniciare vengono preriscaldati e poi immersi in un letto fluido di polvere che, a contatto con le superfici metalliche opportunamente preriscaldate, fonde ed aderisce al supporto. La temperatura ed il tempo di immersione sono gli unici due parametri per controllare lo spessore accumulato.

Il contenitore del letto fluido è costituito da due compartimenti sovrapposti. La parte superiore è aperta per permettere l'immissione dei pezzi da rivestire ed è destinata a contenere la polvere da fluidizzare, quella inferiore è separata da un setto poroso attraverso il quale passa aria compressa che, giungendo a contatto con

la polvere sovrastante, la disperde come una sospensione, aumentandone il volume quasi fosse in ebollizione. È proprio in questa sospensione che i pezzi preriscaldati vengono immersi.

Il processo viene tutt'oggi utilizzato per polveri termoplastiche come polietilene e nylon e raramente per le termoindurenti, limitato ai casi in cui l'inevitabile ed elevato spessore risulta essere una caratteristica necessaria o comunque favorevole.

Una evoluzione del sistema a letto fluido è quella del caricamento elettrostatico della polvere. In questo caso il pezzo non viene preriscaldato ma solo tenuto a potenziale elettrico nullo (collegato a terra). L'aria necessaria a mantenere fluida la polvere è inferiore e la carica viene trasferita attraverso degli elettrodi sulla superficie interna del contenitore mantenuti ad alta differenza di potenziale. Gli ioni polvere che si vengono a creare sono così attratti elettrostaticamente dal pezzo e la distribuzione risulta più uniforme.

1.3.2 Verniciatura a fiamma- spruzzo

La tecnica è stata introdotta per l'applicazione delle vernici termoplastiche. Il processo è molto semplice: la polvere, trasportata e fluidificata dall'aria compressa, va ad alimentare la pistola fiamma. Da qui viene iniettata ad alta velocità attraverso una fiamma di propano che completa la fusione delle particelle, le quali in forma di gocce viscosi si depositano sul substrato. Una fase delicata è proprio quella del riscaldamento delle particelle che potrebbero pirolizzare se stazionassero troppo tempo ad alta temperatura; la distribuzione delle particelle deve inoltre essere stretta per evitare che le particelle grandi fondano e quelle piccole invece si degradino.

Questo metodo permette l'applicazione della vernice a polveri per tutti i tipi di substrato, dal metallo al legno e alla gomma perché non necessita di un ulteriore riscaldamento che garantisca la formazione del film.

1.3.3 Verniciatura elettrostatica a spruzzo

È il processo applicativo più comune, sia per la sua flessibilità che per la sua versatilità, per tale motivo ne verrà qui dedicata una più accurata descrizione. Tale processo prevede l'utilizzo di pistole per lo spruzzo che possono essere azionate manualmente o in automatico.

La polvere giunge alla pistola attraverso un tubo flessibile collegato al serbatoio. Da qui, caricata elettrostaticamente, viene spruzzata per mezzo di aria compressa.

La traiettoria delle particelle di vernice tra l'ugello e il substrato da ricoprire è determinata da una combinazione di forze elettriche e meccaniche. Le prime sono il risultato dell'interazione tra le particelle cariche ed il manufatto collegato a terra mentre le altre derivano dall'aria che trasporta la polvere. Poiché le particelle sono costituite da materiale isolante, mantengono la loro carica e aderiscono alla superficie

da ricoprire, rimanendovi attaccate grazie al campo elettrico applicato; esse vanno ad aderire alle parti scoperte fornendo in genere un rivestimento molto regolare.

È importante fare distinzione fra le due tecnologie in commercio adottate per caricare le particelle di polvere: ad effetto tribo e ad effetto corona.

Le pistole triboelettriche utilizzano la frizione che si crea tra la polvere in movimento e la lunga canna della pistola, per cui il materiale di cui è costruita quest'ultima (teflon), deve essere scelto con cura per creare la massima differenza di tensione tra la canna e la polvere (fig.1.1). Si generano cariche positive sulle particelle di polvere, negative sul tubo di teflon.

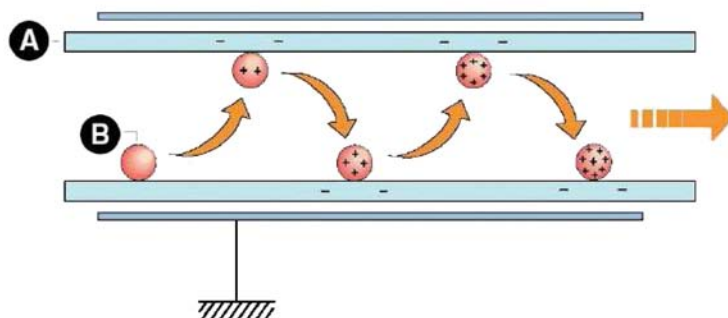


Figura 1.1: schema del caricamento elettrostatico in una canna di una pistola triboelettrica. A teflon; B particella di polvere.

Le particelle positive, una volta lasciata la pistola, sono attratte dal pezzo da verniciare collegato elettricamente a massa. Questo processo causa l'inevitabile deterioramento della canna della pistola, che va necessariamente cambiata periodicamente. A ciò si aggiunge anche lo svantaggio che differenti tipi di polvere evidenziano un comportamento estremamente diverso ([2]): le resine epossidiche si caricano maggiormente che in un sistema corona mentre le poliestere e le ibride epossidiche-poliestere non garantiscono un corretto caricamento ([4]). La quantità di polvere erogabile è oltretutto inferiore a quella che permette il sistema corona, obbligando all'utilizzo di quasi il 50% in più di pistole.

La carica elettrostatica, utile a trattenere attaccata al pezzo la polvere prima della messa in forno, non è spesso sufficiente a direzionare la nube di polvere su manufatti con superfici ampie.



Figura 1.2: esempio di ugello a dita

Per questo scopo le pistole triboelettriche sono fornite di lunghi ugelli (fig.1.2) che aiutano, incanalandola, una miglior distribuzione della polvere. Rispetto alle più evolute pistole corona, le triboelettriche presentano però la precisa peculiarità di riuscire a ricoprire oggetti anche di forma estremamente complicata, non soffrendo di problematiche come la gabbia di Faraday (di cui meglio si tratterà nel paragrafo 3.4), garantendo una buona penetrazione nelle cavità.

Le pistole ad effetto corona rappresentano la tecnologia ormai più diffusa soprattutto per diversi vantaggi rispetto al sistema triboelettrico. Le forze elettrostatiche generate sono nettamente più forti, garantendo una facile distribuzione della vernice (fatta eccezione per gli spigoli), mantenendo invariato il comportamento anche con differenti tipi di polvere, nonché la capacità di coprire le parti fig. 1.3 schema di una pistola coronanascoste non direttamente sotto il getto aerodinamico della pistola.

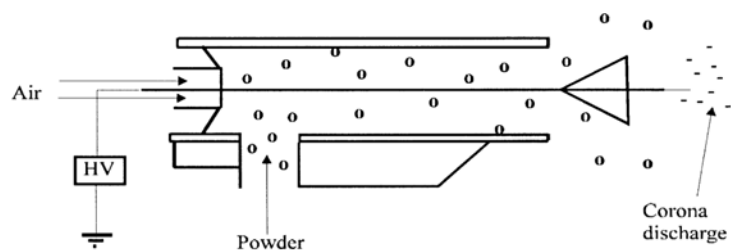


Figura 1.3: Schema di una pistola ad effetto corona

Nel sistema a caricamento-corona viene creato un campo elettrico tra la pistola e il pezzo. Un elettrodo, posto sulla punta della pistola, è mantenuto ad un alto potenziale elettrico negativo (60-100kV), generando un campo elettrico fra se ed il manufatto collegato elettricamente a terra. In prossimità delle punte dell'elettrodo (e qui l'origine del nome corona), il campo elettrico presenta la sua massima forza causando la ionizzazione dell'aria lì vicina. Gli elettroni liberi accelerano sotto l'influenza del campo elettrico andando a colpire le molecole di aria. Se la potenza del campo è adeguata e l'elettrone nel suo viaggio lungo le linee ha raccolto abbastanza energia cinetica, l'impatto con la molecola sarà tale da scinderla formando due elettroni secondari e uno ione positivo (il residuo della molecola). Il processo continua a catena, creando una zona altamente densa elettroni e ioni liberi.

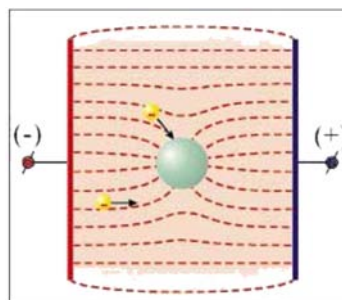


Figura 1.4: particella neutra all'interno di un campo elettrico

La particella dielettrica scarica altererà il campo elettrico esterno, tanto che alcune linee tenderanno verso la sua superficie. Risultato è un bombardamento ionico che causa il caricamento negativo della superficie della particella di polvere. Questo processo continua fino a che la carica accumulata nella particella è sufficiente a creare un proprio campo elettrico. A questo punto le linee del campo elettrico esterno saranno respinte dalla particella: la particella ha raggiunto il massimo della carica.

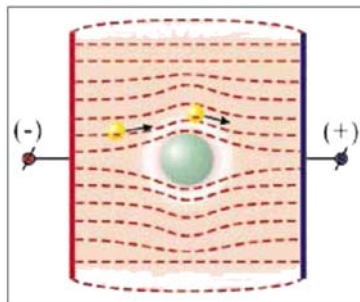


Figura 1.5: Particella carica elettricamente immersa in un campo elettrico

1.3.4 Nuovi sistemi d'applicazione

Nel paragrafo 1.1 si è evidenziato il limite che oggi si presenta nella verniciatura a polvere dei coil. È proprio questo settore che ha spinto allo studio di nuovi sistemi in grado di garantire alte velocità e bassi spessori contemporaneamente. Il progetto più interessante è quello della spazzola elettromagnetica.

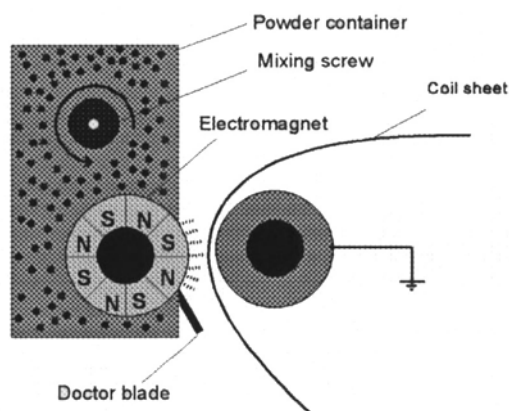


Figura 1.6: schema del sistema a spazzola elettromagnetica

Il progetto è della DSM resins e di Michael Huber ([1]) ed è qui illustrato in fig. 1.6. Le particelle di polvere sono mescolate continuamente assieme alle cosiddette particelle-trasporto fatte di materiale ferromagnetico all'interno e rivestimento in teflon (fig.1.7).

Il continuo sfregamento carica positivamente (effetto tribo) la polvere e negativamente il teflon. Il sistema comprende un rullo magnetico che attrae il cuore

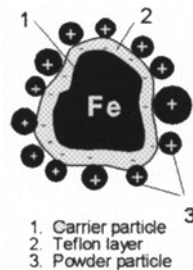


Figura 1.7: Particella-transporto

ferromagnetico delle particelle-transporto ora ricoperte esternamente dalla polvere da esse attratta elettrostaticamente. L'aspetto del rullo carico di particelle ricorda quello di una spazzola, chiamata appunto elettromagnetica (EMB: electromagnetic brush), la quale ruota vicino al foglio di coil opportunamente mantenuto a potenziale elettrico nullo o negativo così da attrarre su sé le particelle di polvere. A questo punto il rullo magnetico continua a girare con solo le particelle-transporto che vengono subito staccate da una lama detta doctor blade e messe nuovamente in mescolazione.

La macchina in laboratorio ha raggiunto la velocità lineare di 130m/min applicando un sottile strato di polvere che può essere regolato cambiando il potenziale elettrico del coil. Enorme vantaggio viene anche dall'efficienza di trasferimento che pare sia del 100% permettendo l'eliminazione dei sistemi di recupero.

1.4 Le componenti di un impianto di applicazione

La fase di applicazione è oggi giorno completamente meccanizzata per aumentarne la produttività anche se è spesso richiesto l'intervento dell'uomo per ricoprire di vernice le parti più nascoste. Gli attuali impianti in circolazione comprendono diverse unità.

Seguendo fig.1.8 è possibile notare:

1. cabina verniciatura;
2. ciclone;
3. cabina polveri;
4. controlli d'impianto;
5. depolveratore;
6. sistema di trasporto;
7. i reciprocatori con le pistole.

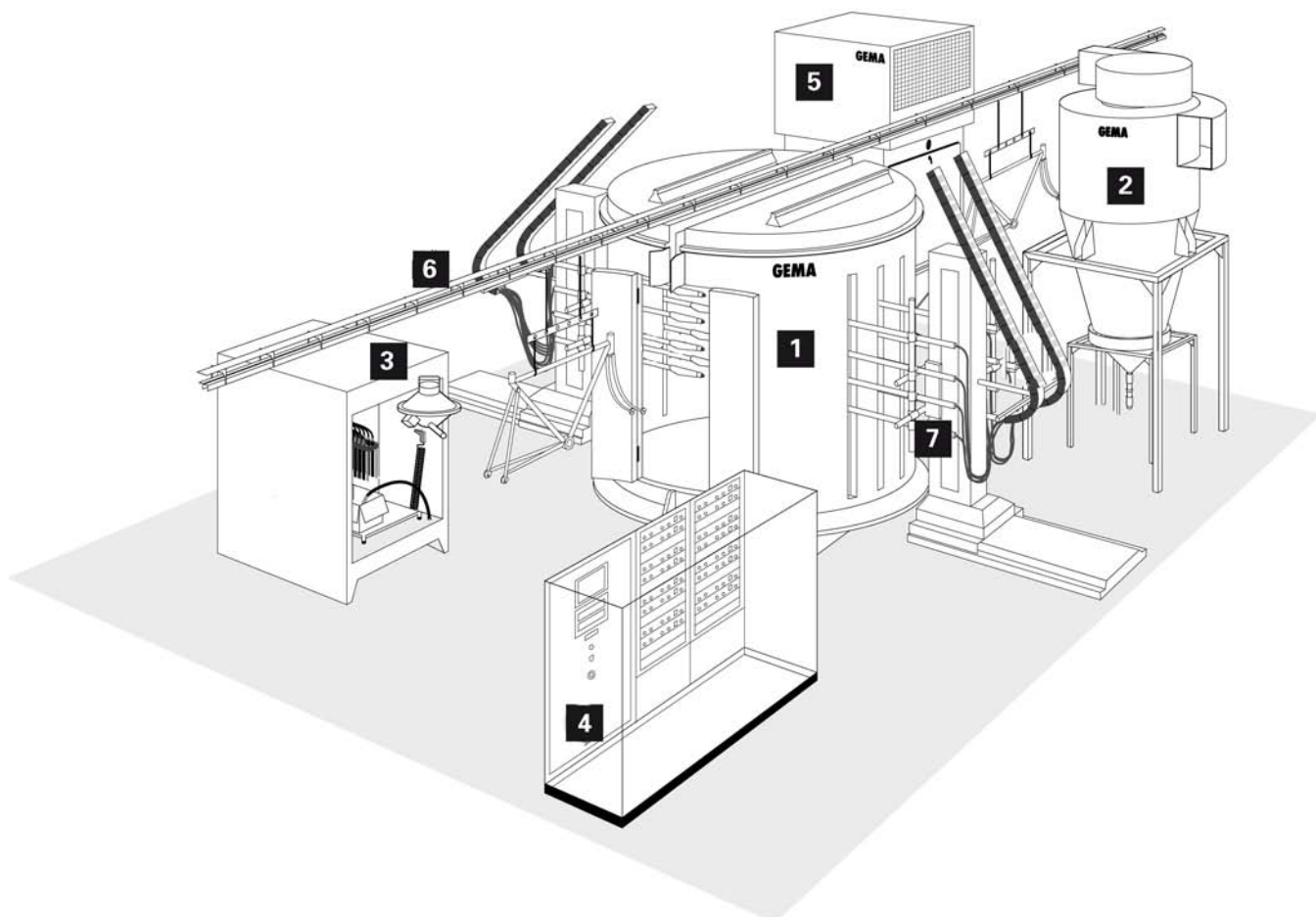


Figura 1.8: Tipico impianto di verniciatura a polvere

1.4.1 cabina polveri

La polvere, a differenza delle vernici diluite in solventi o acqua, non può sfruttare la spinta di una pompa, viene così fluidificata con l'aiuto di aria compressa per poi essere sospinta ed incanalata verso il manufatto. La cabina polveri è il luogo dove tutte queste operazioni vengono svolte. La polvere è accumulata in un recipiente traforato sul fondo attraverso cui passa l'aria compressa che la mantiene fluida (del tutto simile al sistema del letto fluido descritto nel paragrafo 1.3.1). Un tubo di pescaggio aspira il prodotto con l'aiuto di un sistema a venturi. Quest'ultimo venduto solitamente assieme alle pistole e all'unità di comando delle stesse in quanto è una componente fondamentale dove si definisce la portata di polvere e l'omogeneità del flusso (il principio di funzionamento verrà meglio trattato nel capitolo 3 in). La cabina riceve anche la polvere recuperata durante l'applicazione ed è mantenuta costantemente in depressione affinché non vi sia dispersione nell'aria dei granuli più sottili.

1.4.2 cabina di verniciatura

Seguendo il percorso della polvere, dopo essere stata fluidificata, questa viene portata alla cabina di verniciatura dove avviene l'applicazione vera e propria.

Le cabine di verniciatura hanno assunto negli anni forme e strutture le più varie possibili. Le prime presentavano forma di parallelepipedo e sul fondo un tappeto mobile, la cui funzione era quella di recuperare l'over-spray.

I materiali più comunemente utilizzati per la loro costruzione sono quasi esclusivamente il PVC e l'acciaio inox.

La forma e le dimensioni sono sempre state dettate dalla necessità di ridurre i tempi del cambio colore, che ha sempre spinto i costruttori nella ricerca di novità in tale direzione oltre che l'applicazione di sistemi che riducessero questi tempi. La frammentazione del mercato e l'introduzione di colori sempre nuovi, che consentissero agli addetti ai lavori di essere più competitivi, ha accentuato sempre di più negli anni questa necessità.

Negli impianti ad alta produttività, si è ricorso all'installazione della doppia cabina, che consente la pulizia della prima cabina, nel mentre lavora la seconda e viceversa. Negli ultimi anni, sono state messe a punto cabine che consentono un rapido cambio colore, stimato mediamente in circa 10 minuti. Questi risultati sono stati raggiunti aumentando le dimensioni delle cabine, facendo in modo che il lancio della polvere in uscita dalle pistole non raggiungesse la parete opposta, ma che l'aspirazione convogliasse l'over-spray direttamente sul fondo.

Particolare cura è stata destinata al fondo della cabina dove si accumula la maggiore quantità di over-spray.

Le cabine hanno assunto forma circolare con il fondo tronco conico, in cui viene inserita l'aspirazione, oppure hanno conservato il fondo rettangolare, ma tutte sono dotate di getti di aria compressa temporizzati che indirizzano la polvere depositata verso le zone di depressione e quindi di aspirazione.

Le esperienze maturate negli anni hanno indotto i costruttori di cabine a ridurre le aperture e ad aumentarne la portata e la prevalenza di aspirazione, quindi la maggior depressione ha evitato le inique fuoriuscite di polvere sia durante l'esercizio che durante la pulizia.

Negli ultimi tempi sono stati adottati sistemi che in automatico consentono la pulizia delle pistole sulle parti esterne ed interne, ed al contempo la pulizia in automatico dei tubi polvere e pompe venturi.

Tutte queste soluzioni hanno consentito una sensibile riduzione dei tempi di pulizia della cabina, per cui, in parecchie installazioni, non si è sentita la necessità di ricorrere all'installazione della seconda cabina.

Parte integrante della cabina di verniciatura sono i reciprocatori, ovvero quei dispositivi automatici che muovono le pistole affinché tutta la superficie del manufatto sia raggiunta. Sono costituiti da una struttura verticale con guide su cui scorre il



Figura 1.9: Esempio di installazione di cabina in PVC con fondo autopulente.

carrello a cui sono fissate le pistole. Il movimento è in senso verticale, dotato di sistema d'inversione.

Gli ultimi modelli sono dotati di encoder per il controllo della corsa del carrello affinché lavori solo nell'intorno delle dimensioni del manufatto senza eccedere in una direzione o nell'altra con conseguenti eccessivi sprechi. Tali sistemi sono comunque concepiti con l'intento di ricoprire al più possibile ogni superficie del pezzo da verniciare senza elemosinare o garantire uniformità allo strato di polvere depositato.

1.4.3 Ciclone

Il ciclone è il principale componente del sistema di recupero dell'over-spray. La sua funzione è quella di separare le particelle di polvere in sospensione nell'aria che giungono dalla cabina di verniciatura.

Meglio detto separatore ciclonico, il ciclone assume nella parte superiore forma cilindrica, nella parte inferiore forma tronco-conica (vedi fig.1.10). All'interno, nella parte superiore, è presente un altro cilindro concentrico di diametro inferiore, collegato direttamente all'aspirazione. Tale geometria è utile per l'effetto centrifugo che separa le particelle di polvere dall'aria.

Il sistema di depressione operante nella cabina di verniciatura, convoglia la sospensione d'aria-polvere nel ciclone. Il flusso viene immesso tangenzialmente al fianco del cilindro esterno, così da favorire la velocità in quella direzione. Nell'intercapedine presente tra i due cilindri, si genera quindi un moto a spirale dall'alto verso il basso. L'aria viene aspirata dal cilindro interno mentre l'inerzia delle particelle di polvere garantirà la discesa delle stesse lungo la superficie interna del ciclone, fino al basso.

È nella parte bassa presente un sistema venturi o a pompa peristaltica che convoglia nel serbatoio della cabina polveri la polvere accumulata, pronta per essere riutilizzata.

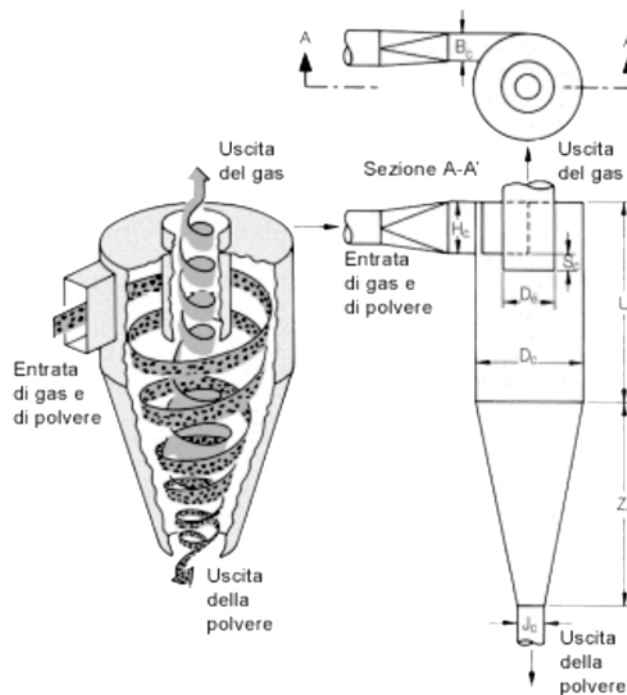


Figura 1.10: Principio di funzionamento di un ciclone

Il diametro del ciclone ed il suo valore di aspirazione determinano quali particelle di polvere cadranno sul fondo e quindi recuperate, e quali saranno aspirate insieme all'aria della sospensione. L'efficienza di separazione è funzione di fattori quali portata d'aria, diametro cilindro esterno ed interno.

1.4.4 Depolveratore

Il depolveratore è la parte che mantiene tutto il sistema in depressione ed ha la stessa identica funzione del sacchetto di accumulo di una qualsiasi scopa elettrica domestica.

L'aria in uscita dal ciclone contiene particelle di polvere molto sottili, che nel separatore ciclonico sono sfuggite alla separazione, rimanendo in sospensione nell'aria. Compito del depolveratore è pulire l'aria da questo residuo di polvere.

Attualmente i depolveratori utilizzati sono del tipo a cartucce, questi hanno sostituito i tradizionali filtri a maniche, in quanto permettono, a parità di dimensioni, una superficie filtrante 20 volte maggiore.

L'aria in ingresso nel depolveratore viene fatta passare attraverso queste cartucce che trattengono la polvere in esso contenuta, prima della definitiva espulsione all'esterno.

I filtri a cartucce presentano inoltre il vantaggio di essere autopulenti, infatti un getto d'aria compressa molto intenso, viene "sparato" nel verso contrario alla filtrazione all'interno delle cartucce, questo distacca le polveri che cadono nel sistema di raccolta, posizionato sul fondo del depolveratore. Il getto d'aria può essere attuato ad intervalli di tempo imposti e regolabili: delle "centraline" elettroniche comandano

le elettrovalvole che permettono il passaggio dell'aria compressa. L'efficienza di filtrazione raggiunge valori prossimi al 99%.

1.5 La verniciatura a polvere UV

La tecnica della verniciatura a polvere ha ad oggi ormai soppiantato la più tradizionale verniciatura liquida nel settore dei metalli. I vantaggi sono enormi eppure la sua diffusione è ora arrestata. La fase di polimerizzazione infatti richiede temperature di 180°-200°C per tempi di 30 minuti circa, assolutamente non attuabile su manufatti in MDF, plastica o anche composti di differenti metalli, causandone la deformazione o addirittura rottura.

Assieme allo spessore, il grado di polimerizzazione della polvere è uno dei parametri più importanti in quanto garantisce le doti di resistenza meccanica e alla corrosione, è importante quindi poterlo ben controllare.

Le soluzioni che ad oggi sembrano poter superare l'ostacolo sono quelle di usare polveri termoindurenti che reticolano a basse temperature (120°-140°) o mediante radiazione UV, dette UV-indurenti. Come già accennato al paragrafo 1.2, la seconda soluzione è sicuramente la vincente in quanto evita che la reticolazione anticipata interferisca con la fase di fusione. Quest'ultima è il principale parametro per un buon risultato estetico, infatti la parte più esterna dello strato di polvere è caratterizzata dalle particelle più grandi (la carica maggiore gli permette di vincere la repulsione degli strati di polvere già presenti) che richiedono più tempo per defluire e che altrimenti sono la principale causa di minore brillantezza, irregolare finitura e buccia d'arancia.

Alcuni impianti in cui la verniciatura a polveri termoindurenti del legno è una realtà si limitano all'applicazione solo su manufatti di precise e rigide dimensioni (non superiore ai 2cm di spessore) e di pregiato MDF, l'unico che riesce a resistere alle tensioni termiche esercitate. La verniciatura con radiazione UV rappresenta sicuramente l'unica via per entrare in nuovi settori grazie alla possibilità di ottenere ottimi risultati anche a 90°C([5]).

Ulteriore vantaggio è che le polveri indurenti a bassa temperatura richiedono un attento stoccaggio in ambienti freschi, problema che non riguarda le UV-indurenti. Ciò nonostante il settore della verniciatura non riesce ancora ad accettare a pieno questa tecnologia perché presenta nuove e diverse problematiche.

La temperatura di 90°C per un tempo di 6 minuti non è ancora sufficientemente bassa ed in presenza di manufatti di media grande dimensione, la difficile distribuzione del calore ne causa l'inevitabile deformazione. Alcune fonti sostengono come riscaldare mediante radiazione infrarossa (evitando il forno a convezione forzata) sia una valida soluzione in quanto garantisce grandi energie specifiche ma bassa penetrazione. È evidentemente una idea fallimentare. Nessuno la utilizza su manufatti

termosensibili se non per preriscaldare leggermente i pezzi in quanto la concentrazione di calore e non la sua attenta uniformità sono principali fonti di tensioni interne e conseguenti alterazioni del pezzo. Il problema sembra essere stato superato dall'ing. Paolo M. Rinaldi mediante l'utilizzo di un classico forno a convezione ma estremamente diverso nel cuore. La movimentazione dell'aria è strettamente tenuta sotto controllo elettronicamente, gestendo le variazioni di densità e le perdite di carico al variare della temperatura, nonché mantenendo un moto laminare del flusso che non investe mai direttamente il manufatto e garantendo temperature uniformi su tutta la lunghezza di 15 metri del forno ([5]).

L'altro aspetto che ha bloccato il diffondersi della verniciatura a polveri UV è la incapacità della radiazione ultravioletta di penetrare in profondità. Gli attuali sistemi automatici di applicazione della polvere sono progettati per erogare quanto più prodotto possibile al fine di coprire al meglio il manufatto. Lo stesso ulteriore intervento manuale non va in favore di una attenta distribuzione della vernice. Frutto della collaborazione con l'ing. Paolo Rinaldi, si è sviluppata una soluzione anche in questo senso di cui meglio si descriverà nel prossimo capitolo.

Aggiuntiva difficoltà ma di facile soluzione è stata quella presentata da materiali come MDF e plastiche. Questi sono per natura non conduttivi, non permettono quindi di attrarre elettrostaticamente la polvere caricata. Una semplice preumidificazione delle superfici consente di superare brillantemente l'ostacolo. Sono i sali disciolti nell'acqua che trasportano le cariche garantendo l'attacco della polvere, è importante però assicurarsi che questa umidità abbia tempo necessario ad evaporare prima che la polvere indurisca.

La verniciatura a polveri UV-indurenti probabilmente porterà le qualità della verniciatura a polvere in nuovi settori ma non bisogna considerarla un'alternativa ai classici e funzionanti impianti a termoindurenti. Per i materiali metallici infatti, dove la temperatura di reticolazione non rappresentano un problema, la polvere termoindurente rimane la più economica come materia prima (4€/kg contro il 16€/kg della UV) ed anche come consumi energetici (le lampade UV richiedono molta potenza e vanno cambiate periodicamente) oltre che garantire le stesse doti di resistenza se non migliori (nel caso di grossi spessori di polvere non ben distribuita dove l'UV non penetra).

Capitolo 2

L'innovazione nell'applicazione

Lo sviluppo di un nuovo sistema, indipendentemente dal settore di cui ci si occupa, ha sicuramente come base un'attenta analisi di quello che già il mondo tecnologico può offrire. Si parte con il cercare di emularlo, creandone anche una semplice copia, ed è solo dopo che si inizia a migliorarlo e a trasformarlo verso le proprie necessità. La seguente descrizione sull'ideazione e costruzione di un nuovo sistema di applicazione della polvere per verniciatura segue la filosofia sopra esposta.

Il sistema a spruzzo elettrostatico per esempio, è stato ripreso a pieno. Non si è ritenuto necessario un suo miglioramento data la già sufficiente flessibilità delle regolazioni possibili, senza tener conto che un suo studio approfondito richiederebbe troppe risorse ingiustificate.

Cabina polveri, ciclone e depolveratore sono stati riprodotti uguali a quelli in commercio, grazie all'esperienza dell'ing. Paolo Rinaldi e alle maestranze presenti in azienda. Questo ha permesso un risparmio in termini di costi ma non si sono apportate modifiche o sviluppi rispetto ai sistemi attuali.

Le altre unità quali, sistema di trasporto, cabina di verniciatura e la gestione elettronica sono state implementate in casa. Le scelte hanno seguito ovviamente come punto d'orientamento le specifiche richieste del cliente, quali:

- materiale del manufatto;
- forma del manufatto;
- volume produttivo;

oltre naturalmente la qualità del prodotto finito e la competitività dell'investimento, aspetti quest'ultimi che riguardano l'impianto nel suo complesso, non d'interesse in questa sede.

2.1 I portoni sezionali

Non sono molto diffusi in Italia ma nel nord europa e negli Stati Uniti i portoni sezionali a pannelli sandwich sono la principale scelta non solo per uso industriale

ma anche domestico. La loro principale caratteristica è infatti l'isolamento termico, necessità indiscussa per climi freddi.



Figura 2.1: Portone sezionale semiaperto

Usati di solito per portoni di garage, devono il loro nome al fatto che sono composti da 4-5 pannelli incernierati tra loro che scorrono sulle guide laterali (fig. 2.1). Ogni pannello è composto esternamente da due lamiere in metallo preverniciato e all'interno da schiuma poliuretana.

I pannelli sandwich nascono da una profilatura che srotola in continuo due coil preverniciati. Due fogli in metallo vengono così sagomati contemporaneamente e la schiuma poliuretana viene iniettata non appena i due fogli vengono uniti.

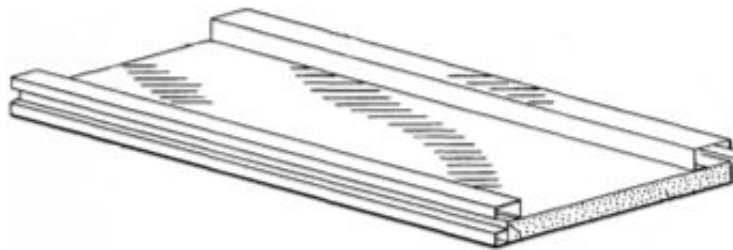


Figura 2.2: Pannello sandwich

La linea di produzione a partire dai coil verniciati è molto grande ed è operata da aziende specializzate che forniscono solo pochi colori. La preverniciatura dei coil è molto resistente in quanto fatta polimerizzare ad alte temperature ma, dopo l'aggiunta di poliuretano, materia termosensibile, si rendono impossibili successive verniciature con il metodo classico. Per soddisfare le richieste di molteplici colori, le aziende che operano con i clienti finali sono vincolate a verniciare ulteriormente, adottando però la fragile verniciatura liquida a freddo. È in questa posizione che si inserisce l'impianto a polvere qui descritto.

Le dimensioni del pannello sandwich secondo cui il prototipo qui sviluppato è stato dimensionato sono: 0,55m di larghezza, per 2,5m di lunghezza e 4,5cm circa di spessore.



Figura 2.3: Foto del lato corto del pannello

La fig. 2.3 evidenzia la forma del pannello. Se le dimensioni sono rilevanti per la definizione della grandezza e della capacità produttiva del sistema, la sua forma è fondamentale per studiarne il comportamento elettrostatico.

2.2 sistema di movimentazione

Negli impianti di verniciatura a polvere UV, i sistemi di trasporto dei manufatti che si possono adottare sono del tipo verticale oppure orizzontali. Nel primo caso i manufatti vengono appesi verticalmente a bilancelle trainate da un trasportatore aereo a catena, con velocità di transito compreso tra 2 e 3 m/min . Mentre il sistema di trasporto orizzontale è semplicemente costituito da rulli motorizzati in acciaio (inox e/o zincato) su cui vengono poggiati i manufatti e le velocità sono comprese fra 1 e 2 m/min .

Sotto l'aspetto impiantistico i due sistemi risultano molto diversi, con caratteristiche peculiari che qui descriviamo.

Il sistema verticale nasce per le grosse capacità produttive, non solo per le maggiori velocità di avanzamento ma anche per la presenza di punti di accumulo che permettono maggiore compattezza rispetto al sistema orizzontale a parità di suolo occupato.

Si possono distinguere due tipi fondamentali:

- monorotaia
- birotaia

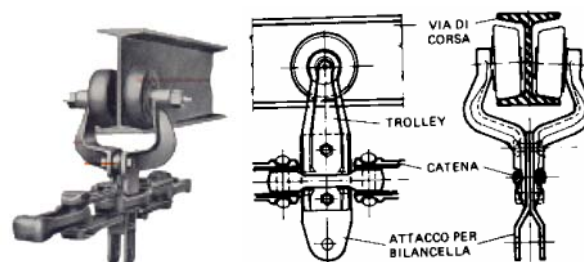


Figura 2.4: Trasportatore verticale monorotaia

La prima categoria è la più semplice tra le due. Sono costituite infatti da una sola via di corsa (di solito trafilati IPN) su cui scorrono dei carrelli detti trolley (vedi fig.2.4). Quest'ultimi sorreggono direttamente le bilancelle e vengono sospinti da una catena a circuito chiuso che muove il tutto in sincronia.

I sistemi di trasporto verticale birotaia invece presentano due vie di corsa una sopra l'altra. Quella in alto sostiene il sistema di movimentazione, quindi trolley e catena, mentre quella inferiore, a cui sono attaccati un secondo trolley con bilancella, sostiene i carichi da trasportare.

L'impianto è sicuramente più costoso e richiede una maggiore manutenzione ma consente di staccare in automatico dal moto del resto del sistema, senza l'intervento dell'uomo, la parte inferiore con le bilancelle. Si possono così creare zone della linea a velocità differenti, nonché zone di accumulo o permettere l'ingresso (così come l'uscita) delle bilancelle in arrivo da un'altra linea o zona di lavorazione, tutto in automatico.

I vantaggi dei sistemi verticale in genere possono essere così riassumibili:

- maggior capacità produttiva;
- disponibilità dello spazio sottostante;
- possibilità di compiere percorsi tortuosi;
- possibilità di creare zone di accumulo.

Si potrebbe aggiungere anche il fatto che il pezzo, così sollevato, mostra tutte le sue facce, indispensabile nella verniciatura di pezzi tridimensionali o, per pannelli sandwich, qualora sia richiesta la copertura di entrambi i lati.

I trasportatori orizzontali nascono per target totalmente diversi rispetto a quelli verticali. Nella verniciatura è praticamente impossibile trovare esempi del genere in quanto è facile che si imbrattino con la vernice di overspray. Rappresentano però il metodo più economico e semplice per movimentare dei pezzi e come si spiegherà meglio avanti, sono stati la scelta preferita anche in questa sede.

Per trasportatori orizzontali si vuole intendere sistemi meccanici fissi quali possono essere quelli a rulliere o a nastro. Per i secondi si può parlare di un caso particolare del modello a rulli, dove è stato aggiunto un nastro per creare continuità fra gli interassi.

Come si è detto poc'anzi, la scelta per il prototipo è stata a favore dei trasportatori orizzontali per diversi motivi.

Come primo c'è sicuramente la capacità produttiva richiesta dal cliente. Si tratta di 25.000 pannelli verniciati l'anno che corrispondono a circa 62.500 m lineari all'anno: l'impianto dovrà garantire una velocità media di 0,7 m/min. I numeri

sono quindi in linea con le capacità di un trasportatore orizzontale, inoltre non è richiesta la verniciatura del lato "b" del pannello.

Altro aspetto importante è il costo. Un impianto verticale rappresenta un ordine di grandezza in più in termini di costi economici e di complessità impiantistica.

La capacità produttiva richiesta ha consentito di progettare tutto in lunghezza. Infatti un vincolo dell'impianto è il tempo di stazionamento dei pannelli nel forno: per maggiori velocità di avanzamento è necessario un forno più lungo e viceversa. Lavorare in continuo e con sviluppo solo longitudinale non impone alcuna limitazione sulla lunghezza dei pannelli che in alcuni casi possono arrivare anche a 12 m !

2.2.1 Il nastro trasportatore

La realizzazione del prototipo, anche per la sua natura non definitiva, ha cercato sempre il risparmio, che ha rappresentato il criterio di scelta per la maggior parte degli ambiti, dove possibile (vedi fig.2.5 sul confronto fra prototipo e modello per il cliente).

Il trasporto così si è orientato sul sistema orizzontale come già più volte ribadito ma oltretutto ci si è rivolti verso il modello a nastro. Questo permette un'ulteriore semplificazione impiantistica, assenza di catene o ingranaggi e minor numero di rulli, che si ripercuote sul risparmio in termini monetari.



Figura 2.5: Trasportatore meccanico. A sinistra il prototipo, a destra la versione per il cliente in Francia

Lungo $2,4\text{ m}$, largo e alto $0,9\text{ m}$, Il nastro trasportatore del prototipo è sostanzialmente fatto di una struttura in semplice ferro al carbonio. Profilati a sezione quadrata di 5 cm di lato formano la struttura portante di 4 gambe irrigidite con traverse orizzontali saldate. La struttura superiore è costituita da un piano in lamiera da 2 mm , la stessa con cui sono fatte le battute laterali (visibili in fig.2.5A). Sugli estremi lunghi sono montati due soli rulli di 114 mm di diametro e nell'intermezzo è posto un secondo piano in lamiera sul quale viene fatto scorrere la parte superiore del nastro. Accorgimento quest'ultimo per aumentare la rigidità delle battute laterali che sorreggono i rulli.

Il motore è un modello economico della Bonfiglioli. Ne utilizzeremo in totale due per il sistema di applicazione della polvere, di cui uno per il trasporto. Si tratta di un motore asincrono a 4 poli da $0,18\text{ kW}$ di potenza nominale con una coppia nominale di $1,3\text{ Nm}$ a 1320 rpm . Tenendo conto che la coppia di spunto è indicata

pari a 1,9 volte quella nominale si è più che tranquilli che già senza riduttore si potrebbe muovere il nostro sistema. Il pannello pesa non più di 10 kg al che per portarlo alla velocità di 1 m/min in un secondo di tempo bisogna battere un'inerzia di

$$F_{inerzia} = \frac{1}{60 \cdot 1} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10\text{kg} = 0,17\text{ N} \quad (2.1)$$

che, considerando il braccio dei rulli, genera una coppia di

$$C_{utilizzatore} = 0,17 \cdot \frac{0,117}{2} = 0,01\text{ Nm} \quad (2.2)$$

Ovviamente non è richiesta una velocità di 1320 rpm e si è utilizzato un riduttore con rapporto $\frac{1}{60}$. questi riduttori hanno la flangia frontale che è facilmente bullonata alla nostra piastra laterale come in fig.2.6.



Figura 2.6: Motore e riduttore del nastro trasportatore

Il moto è trasferito su di un solo rullo, il secondo invece è fornito di dispositivo per il pretensionamento del nastro in PVC.

Altro aspetto molto utile dal punto di vista pratico è la presenza di battute fatte con piccoli rulli in PVC. Sono visibili in fig.2.5A ed in particolare in fig.2.7. Sono molto utili per avere un posizionamento veloce e preciso del pannello. Semplificano anche il compito di regolazione della corsa della pistola poichè, in caso di cambio dimensioni pannello, bisognerà regolare solo una delle due fotocellule (vedi paragrafo 2.3).



Figura 2.7: Particolare battute in PVC

Il problema dell'imbrattamento del tappeto esposto in apertura di questo paragrafo è stato tranquillamente superato come meglio verrà descritto nel paragrafo 2.4 sulla cabina verniciatura.

2.3 Il reciprocatore

È l'unità più delicata del sistema sviluppato. È infatti il sistema che muove la pistola, ne costituisce quindi insieme ad essa il cuore del sistema d'applicazione.

L'obiettivo è quello di muovere di moto alternato la pistola in una sola dimensione. Soluzione univoca è sicuramente quella di una struttura di sostegno su cui far scorrere un carrello ai cui è montata la pistola. Per trasferire il moto però si presentano diverse soluzioni tecnologiche. Quali per esempio:

- sistema a camma;
- sistema a quadrilatero articolato;
- sistema con cremagliera;
- sistema a cinghia.

Ognuno di questi ha precise peculiarità e pregi che veniamo ora a descrivere per arrivare alla scelta realizzata.

Il primo sistema proposto prevede la presenza di una camma che spingendo un cedente a punteria ne trasferisca la spinta per muovere il carrello con pistola. Il vantaggio di un sistema di questo tipo è che permette di seguire infinite leggi di moto lasciando che il motore giri costante, senza necessità di interventi elettronici o uso di fotocellule. Le camme però sono tutt'altro che flessibili nelle regolazioni. La loro natura è infatti quella di garantire il rispetto della legge di moto per la quale sono state progettate, un'eventuale modifica richiederebbe la sostituzione della camma stessa. Nel nostro caso, il getto della pistola ha un raggio d'azione molto ampio rispetto alla larghezza del pannello (aspetto che si analizzerà nel capitolo 3), è difficile quindi evidenziare forti differenze al cambio di legge di moto ed inoltre non è necessario raggiungere alte velocità e prestazioni tipiche dei sistemi a camme.

I sistemi a quadrilateri articolati, al pari delle camme, lasciano il motore a numero di giri costante non richiedendo quindi un controllo elettronico e fotocellule. Essi consentono di imprimere maggiori forze ma sono più vincolati dal punto di vista delle leggi di moto realizzabili, caratteristica in questo caso comunque non necessaria.

L'idea progettuale che si potrebbe assumere è quella a manovellismo ordinario centrato in cui l'alzata e la discesa presentano comportamenti speculari.

In conclusione, questa soluzione tecnologica si presenta buona ma l'aspetto che la esclude è la richiesta di spazio necessaria a far compiere i loro giri a manovella e biella nonché una leggera complicanza costruttiva nel caso si voglia modificare il valore d'alzata. È infatti nelle aspettative del cliente poter verniciare pannelli anche di larghezza variabile.

La soluzione con cremagliera è un'idea che ci sentiamo di eliminare a priori. Si può pensare a due tipi:

- una, con motore montato sul carrello-pistola e cremagliera fissa, appesentirebbe in maniera ingiustificabile il carrello, aumentando consumi e complicando la struttura stessa del carrello;
- l'altra, con motore fisso e cremagliera assieme al carrello, richiederebbe spazi laterali eccessivi per far scorrere la cremagliera.

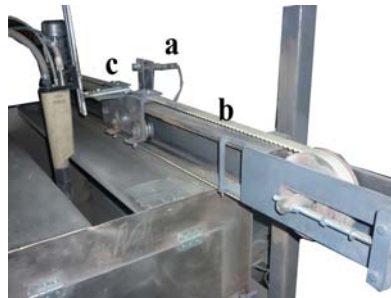


Figura 2.8: Sistema a cinghia trapezoidale. a:sensore di prossimità; b:cinghia; c:carrello

La soluzione ultima, con sistema a cinghia, è stata quella utilizzata. La corsa del carrello è regolata dal posizionamento di due sensori di prossimità. L'inversione di moto è così controllata da un inverter con cui è possibile anche variare le leggi di moto. Quest'ultimo aspetto però, è importante sottolineare, non ha rappresentato una variabile necessaria da gestire, per il solito motivo già esposto dell'ampio raggio d'azione della pistola rispetto alla larghezza dei pannelli. Si è adottata così una legge di moto ad accelerazione costante tagliata (vedi fig.2.9) che, oltretutto è una funziona preinstallata nell'inverter. I tempi di accelerazione, impostabili facilmente da un comando specifico, sono stati fissati sul valore minimo di 0,1 s, tranquilli della leggerezza del carico rispetto alla coppia di spunto del motore. L'inverter presenta comunque dei sistemi di controllo della corrente assorbita nel caso la scelta fatta sia stata troppo azzardata.

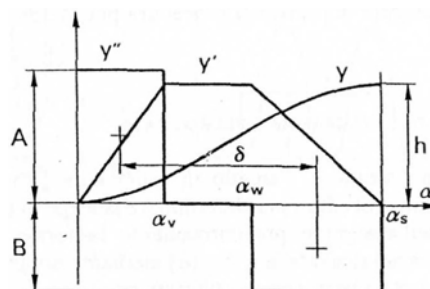


Figura 2.9: Legge di moto ad accelerazione costante tagliata

Per quanto riguarda il motore, è stato scelto lo stesso visto per il sistema motorizzato orizzontale e montato sulla via di corsa, a sua volta saldata sulla struttura della cabina di verniciatura(vedi fig.2.10). Il riduttore è con rapporto 1/20.



Figura 2.10: Motore del reciprocatore. È ben visibile il cuscinetto a cui è agganciata la puleggia

Per quanto riguarda la cinghia, si tratta del modello trapezoidale in poliuretano larghe 25,4 mm e con passo di 5 mm (in grado di sopportare potenze fino a 10W). Le pulegge con flangia, poste ai due estremi sono vendute dalla stessa azienda abbinata alla cinghia come anche i piattelli utili a fissare la stessa sul carrello (fig.2.11).



Figura 2.11: Piattelli di fissaggio cinghia su carrello

2.4 la cabina di verniciatura

La cabina di verniciatura, per gli aspetti principali, deve essere sostanzialmente simile a quelle tipiche dei sistemi tradizionali. L'aspirazione viene effettuata sempre dal fondo e le dimensioni devono essere generose per evitare che la polvere si accumuli sulle pareti verticali. Tuttavia, quest'ultimo aspetto è stato risparmiato per il modello del prototipo per questioni non solo economiche ma anche di spazio.

In fig.2.12 è possibile notare le differenti cabine realizzate.

Entrambe le cabine presentano uno scheletro esterno in profilati di sezione quadrata (50mm x 50mm) utile anche per agganciare il reciprocatore. La cabina vera e propria, in entrambi i casi è fatta in acciaio inox ma, rispetto alle tradizionali, differisce per il sistema di movimentazione dei pannelli. Nel caso studiato del prototipo



Figura 2.12: Cabine di verniciatura. A: cabina del prototipo; B: cabina per il cliente

è presente un rullo motrice nella parte esterna di uscita della cabina. L'interasse infatti fra il rullo e il nastro trasportatore è abbastanza piccolo per non far cadere il pannello. Mentre nella cabina per il cliente, più grande, è usato un sistema a nastro trasportatore ma composto da più (sono 4) nastri meno larghi. Questa soluzione permette un minore imbrattamento. Vi è comunque un dispositivo di pulizia che pulisce i piccoli nastri.

La differenza dalle cabine tradizionali è ovviamente il sistema orizzontale di verniciatura: il manufatto entra orizzontalmente e il singolo reciprocatore è presente sulla parte superiore.

2.5 La pistola corona

Come descritto nel paragrafo 1.3.3, le pistole ormai più diffuse e versatili sono quelle che sfruttano l'effetto corona. Più soggette al consumo dei propri componenti (la lunga canna in teflon), le pistole triboelettriche rimangono sostanzialmente una prerogativa di oggetti dalla difficile geometria e con cavità profonde, non utili quindi per i pannelli sandwich qui trattati.

Il modello che si è adottato è la pistola corona automatica della ITWGema. Il pacchetto d'acquisto comprende:

- pistola automatica, modello Optigun 2-A(X), tipo GA02;
- unità di comando, modello Opti-Star CG07;
- unità venturi, modello Opti-Flow IG02 (meglio descritto nel principio di funzionamento al paragrafo 3.5.2).

L'unità di comando rappresenta la parte principale a cui bisogna fornire l'aria compressa e l'energia elettrica oltre l'ingresso per l'accensione e lo spegnimento della pistola. La ITWGema la fornisce come unità universale per pistole automatiche o

manuali, triboelettriche o corona; è normale quindi trovare connettori aggiuntivi e comandi non utilizzabili per l'applicazione descritta in questa sede. In fig. 2.13 sono mostrati i vari connettori:

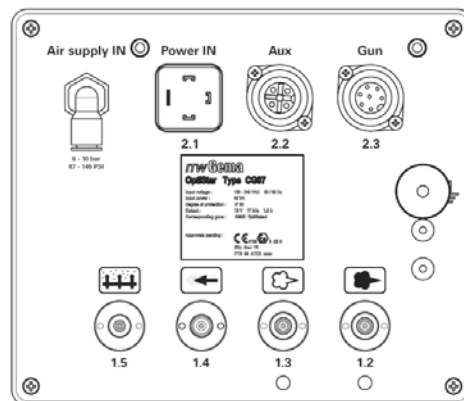


Figura 2.13: lato posteriore dell'unità di controllo Opti-Star

- Connettore 2.0 (Air supply IN) è l'ingresso per l'aria compressa che deve essere deolificata e deumidificata;
- connettore 2.1 (power IN) per l'alimentazione elettrica e per il comando in remoto;
- connettore 2.2 (aux) usato per sistemi di vibrazione del serbatoio polveri portatile spesso fornito con le pistole manuali;
- connettore 2.3 (Gun) è l'uscita per l'alimentazione elettrica della pistola;
- connettore 2.4 è la messa a terra elettrica a cui bisogna collegare anche il pezzo da verniciare anche indirettamente tramite la struttura di sostegno;
- connettore 1.5 è l'aria del letto fluido attivo solo con pistole manuali e serbatoio polveri portatile;
- connettore 1.4 per l'aria cosiddetta di risciacquo: è quella direttamente collegata alla canna della pistola, utile per la spinta dello spruzzo;
- connettore 1.3 e 1.2 per l'aria di "supporto" e del venturi rispettivamente che vanno collegati all'unità venturi (verranno trattate al paragrafo 3.5.2).

Si riporta alle tabelle 2.1 e 2.2 per le caratteristiche in ingresso dell'unità di comando Opti-Star.

Per l'avvio in remoto della pistola basta chiudere il contatto "3" (vedi fig.2.14) con il numero "1". Questo permetterà in remoto il blocco del flusso di polvere e spegnimento del sistema corona ma non consente di intervenire sulle diverse regolazioni di cui l'unità di comando è fornita (per cui bisogna intervenire direttamente sull'unità).

Tabella 2.1: caratteristiche elettriche unità Opit-Star

Caratteristiche elettriche	
Potenza apparente in ingresso	40VA
voltaggio di alimentazione	100-240 V
freq. di alimentazione	50-60 Hz
temperatura d'esercizio	da 0°C a 40°C

Tabella 2.2: aratteristiche sistema pneumatico

Sistema Pnuematico	
Connettore aria compressa	G1/4" - connettore femmina
pressione massima in ingresso	10 bar
pressione di esercizio in ingresso	6 bar
massima umidità nell'aria compressa	1,3 g/m ³
massimo vapore d'oli nell'aria compressa	0,1 mg/m ³

2.6 Gestione elettronica

L'impianto nel suo complesso, presenta molte componenti da controllare o semplicemente monitorare. Ci sono sensori di temperatura per il forno, elettrovalvole per la gestione dei sistema pneumatico, sensori di prossimità, motori elettrici, spie di avviso oltre ovviamente ai sistemi di sicurezza. Una enormità di cavi che la soluzione del PLC semplifica tantissimo.

La parte elettronica è stata sistemata in un armadio apposito dove PLC, relè ed inverter possano essere cablati facilmente. L'interfaccia utente su questo armadio consta di schermo touchscreen ed interruttori vari.

L'alimentazione scelta è di 24 V alternata in quanto quella in continuo presenta possibili problemi di natura elettrochimica in ambienti con acidi.

2.6.1 IL PLC

Il PLC (programmable Logic Controller) nasce come elemento sostitutivo della logica cablata elettronica e dei quadri di controllo a relè e si è qualificato da tempo come elemento insostituibile nell'automazione di fabbrica. In pratica lo si può considerare come un particolare computer di particolari circuiti (interfacce I/O) in grado di dialogare con dispositivi quali pulsanti, sensori, azionamenti e apparecchiature elettroniche in genere.

Il PLC che si è usato è il ST200, modello 226 alimentato a monofase 230 V. Fa parte della serie più compatta ed è quello con il maggior numero di uscite e ingressi, 16 e 24 rispettivamente. Si tratta di connettori digitali (on/off) quindi per quelli analogici si sono dovute agganciare delle unità di ampliamento, comunque non utilizzate per la parte di applicazione della povere.

Entrando nel particolare, si è usato il linguaggio di programmazione Ladder Diagram con cui si sono gestite le seguenti grandezze:



Figura 2.14: Connettore di alimentazione e di accensione remota

- accensione e spegnimento dei motori di nastro trasportatore e reciprocatore;
- spia di avviso parti meccaniche in movimento;
- temporizzatori di accensione pistole e motori reciprocatore e nastro trasportatore;
- sensori di prossimità su nastro trasportatore in ingresso e uscita dal sistema, nonché per il controllo del reciprocatore;
- gestione impulsi in ingresso dal touchscreen.

Questo tipo di PLC presenta le uscite a relè, varrebbe a dire che quando se ne attiva una, viene semplicemente chiuso il contatto fra questa e l'uscita comune, ma non c'è alcun passaggio di corrente. Per meglio capire, è utile fare un esempio seguendo fig. 2.15. Quando si vuole chiudere il primo contatto, quello indicato con ".0", all'interno del PLC verrà semplicemente creato un collegamento fra questo ed il filo comune, ovvero con "1M".

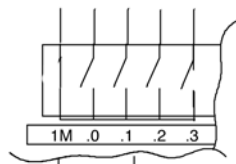


Figura 2.15: Sistema di uscite del PLC

A valle del PLC un relè esterno scatterà, chiudendo il circuito secondario dedicato per quell'utenza. Nel caso di motori collegati ad inverter, il circuito secondario del relè sarà collegato ad un generatore di tensione a 24V continua che andrà ad eccitare gli ingressi dell'inverter.

2.6.2 L'inverter

Gli inverter sono un'altra parte fondamentale dell'elettronica di un macchinario industriale e non solo. La loro funzione è quella di modulare la tensione, la corrente e la frequenza in ingresso ai motori elettrici così da poterne sfruttare tutta l'area di lavoro.

Gli inverter utilizzati nel nostro caso sono stati due, uno per ogni motore, ovviamente sono dei modelli per l'alimentazione a trifase.

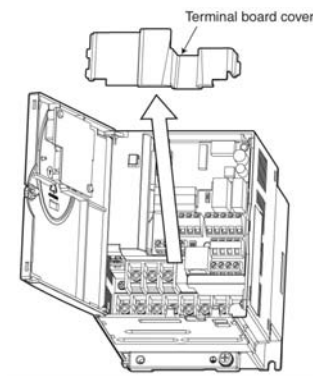


Figura 2.16: I collegamenti di un inverter

Una volta aperta la parte anteriore si possono distinguere due zone (vedi fig.2.16). Nella parte bassa, ulteriormente nascosta e protetta, vi sono i connettori di ingresso e uscita per le utenze, in questo caso trifase. Nella parte superiore invece, troviamo posizionati connettori più piccoli per correnti a 24V continua utili al comando in remoto.

Gli inverter presentano moltissime possibilità di gestione e programmazione per cui gli è stata dedicata parecchia attenzione.

Per quanto riguarda il controllo dell'inverter si presentano diverse soluzioni (bisogna attivarle con un comando specifico, F109):

- controllo tramite sua interfaccia con potenziometro;
- controllo in remoto con comandi analogici;
- controllo in remoto con comandi digitali.

Il primo metodo è ovviamente il più scomodo ma è utile in fase di test e collaudo. Il secondo invece è il più elastico dei tre in quanto permette di modulare liberamente la frequenza in uscita, ovvero la velocità del motore, semplicemente mandando in ingresso su due morsetti specifici una corrente tra 0 e 20 mA o altrimenti una differenza di potenziale fra 0 e 10 V. Il rapporto fra queste grandezze e la frequenza in ingresso viene impostato andando in una sezione specifica dell'inverter, chiamata "parametri estesi". Ovviamente il controllo analogico può essere esteso alle regolazioni di voltaggio e amperaggio in uscita, bast eccitare i morsetti dedicati.

Il terzo tipo di controllo è quello che abbiamo utilizzato in quanto, come più volte ripetuto, non è necessario l'implementazione di specifiche leggi di moto ed un controllo on/off ci è sufficiente. Come però è stato anticipato al paragrafo 2.3, l'inverter permette l'inserimento della legge di moto ad accelerazione costante tagliata. È infatti un'operazione molto semplice che richiede solo l'impostazione di un comando sull'interfaccia dell'inverter dove è possibile inserire: accelerazione costante,

semplice on/off o corrente costante. Il tempo di accelerazione come quello di decelerazione sono impostabili. Basterà così chiudere in corto i contatti "F" e "P24" secondo la fig.2.17 per far partire il motore.

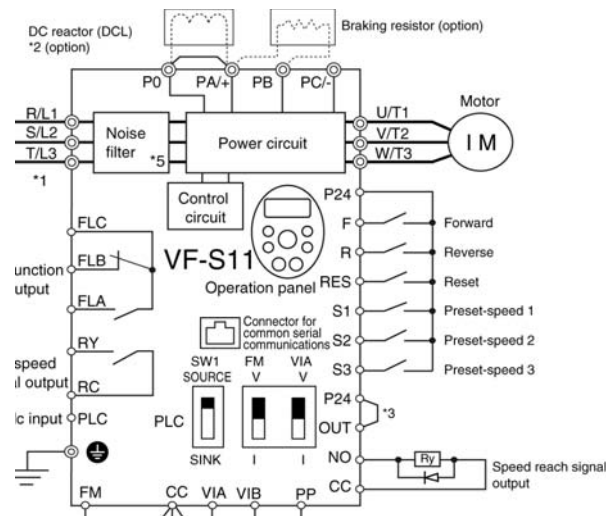


Figura 2.17: L'inverter

Tutti i parametri di tensione, amperaggio e frequenza dovranno essere preinseriti e registrati così che, al segnale di accensione, l'invert possa inviare i valori desiderati.

Il controllo digitale in remoto consente anche delle regolazioni con semplici chiusure intrecciate di contatti.

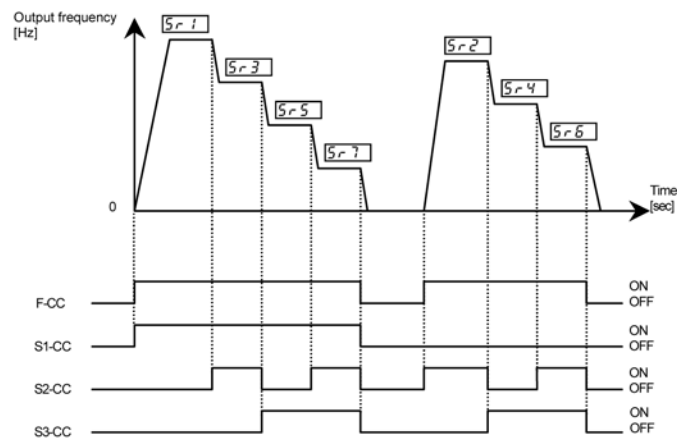


Figura 2.18: Logica di controllo digitale per ottenere diverse frequenze

In fig.2.18 sono visualizzati degli esempi di combinazione di contatti per ottenere 7 diverse frequenze. Quest'ultime dovranno ovviamente essere state preinserite nell'inverter che andrà semplicemente a richiamarle.

Capitolo 3

Ottimizzazione

Nell'ingegneria la sperimentazione gioca un ruolo importante nella progettazione di nuovi prodotti, nello sviluppo di processi produttivi e nel miglioramento del processo. L'obiettivo può essere sovente quello di sviluppare un processo robusto, vale a dire affetto il meno possibile da fonti di variabilità esterne.

In generale, così come nel caso qui analizzato, alcune delle variabili di processo sono controllabili, mentre altre variabili non lo sono. Gli obiettivi quindi che ci si pone sono sostanzialmente:

- determinare quali variabili abbiano maggiore influenza sulla risposta y ;
- determinare quali valori assegnare alle variabili influenti x , in modo che la risposta y risulti quasi sempre prossima al valore nominale desiderato;
- determinare quali valori assegnare alle variabili influenti x , in modo che la variabilità nella risposta y sia piccola;
- determinare quali valori assegnare alle variabili influenti x , in modo che l'effetto delle variabili non controllabili z_1, z_2, \dots, z_q sulla risposta y sia minimizzato.

Gli esperimenti hanno coinvolto diversi fattori (o variabili) e lo scopo è stato quello di trovare se e come questi siano influenti sulla risposta del sistema.

Il settore della verniciatura a polvere ha oggi ormai acquisito abbastanza esperienza nel campo dell'applicazione anche se solo nella gestione di alcuni parametri. L'intento di ricoprire a pieno il manufatto, avere una distribuzione uniforme dal punto di vista estetico (non del meticoloso controllo dello spessore come in questa sede) e superare altre classiche problematiche (di cui al paragrafo 3.4), sono state prerogative che hanno già impegnato il settore prima dell'avvento della verniciatura UV. Il lavoro sperimentale che è stato portato avanti ha usufruito di questo baglio d'esperienza, consentendo di superare più agevolmente alcuni passaggi.

L'approccio generale per pianificare e condurre l'esperimento, detto strategia sperimentale, ha seguito così diverse strade, cogliendone da ognuna gli aspetti positivi:

- approccio a tentativi;
- approccio un-fattore-alla-volta;
- approccio fattoriale.

L'approccio a tentativi consiste nello scegliere una combinazione arbitraria dei fattori coinvolti, condurre l'esperimento ed osservare cosa accade. Questa strategia è usata frequentemente da ingegneri e ricercatori nonché anche in questa sede, sfruttando le conoscenze teoriche e pratiche che la collaborazione con l'ing. Paolo Rinaldi ha garantito.

L'approccio a tentativi presenta ovviamente due grossi svantaggi. Primo, si supponga che il tentativo iniziale non produca i risultati sperati; ora lo sperimentatore deve fare un altro tentativo per tentare di indovinare la corretta combinazione dei livelli dei fattori. Questi tentativi potrebbero continuare a lungo senza alcuna garanzia di successo. Secondo, si supponga che il tentativo iniziale produca un risultato accettabile. Lo sperimentatore sarà tentato di non procedere oltre con le prove, sebbene non ci sia alcuna garanzia che sia stata individuata la soluzione migliore.

Presentandosi come un metodo semplice e soprattutto immediato, spesso se ne abusa l'utilizzo anche nello studio di parametri nuovi di cui non si hanno forti basi a disposizione. È in questo contesto che si è inserito il nostro studio.

L'approccio un-fattore-alla-volta ha rappresentato il primo step di cui ci si è avvalsi per ottenere una prima analisi più accurata rispetto all'approccio per tentativi e che restituisse un'ordine di idee sul comportamento dei singoli parametri. Questo tipo di strategia sperimentale consiste nello scegliere un valore iniziale, o insieme di livelli di base, per ciascun fattore; quindi far variare in successione i livelli di ciascun fattore nel proprio campo di variazione, mantenendo gli altri fattori costanti al loro livello base. Il maggiore svantaggio della strategia un-fattore-alla-volta è che non riesce a tenere conto di possibili interazioni tra i fattori. Un'interazione consiste nel fatto che un fattore non causa lo stesso effetto sulla risposta al variare dei livelli di un altro fattore. Le interazioni tra fattori sono spesso presenti ed in quei casi la strategia un-fattore-alla-volta darà risultati scadenti.

Gli esperimenti un-fattore-alla-volta sono frequentemente eseguiti in pratica ma sono meno efficienti di quelli eseguiti con metodi basati su un approccio statistico, quello fattoriale, dove i fattori variano congiuntamente invece che uno alla volta .

Per lo studio statistico ci si è avvalsi del software Minitab che ha velocizzato la ripetitività di alcune operazioni risparmiando tempo a favore di una più approfondita analisi.

Si riporta qui di seguito una breve descrizione dei metodi statistici utilizzati così da meglio interpretare i risultati ottenuti.

3.1 Anova

Per operare una scrematura dei dati si è usata la tecnica statistica dell'analisi della varianza. L'ANOVA consente infatti di determinare se dei fattori possono o meno influenzare la risposta di un processo.

Per evidenziare la dipendenza o meno della risposta da una variabile sarebbe sufficiente mettere a confronto a coppia le medie delle popolazioni misurate ai vari livelli¹ a cui la variabile è stata posta; scoprire quindi se sono uguali (la risposta non è influenzata dalla variazione di livello) o diverse (la risposta è influenzata). Questo metodo può essere adoperato nel caso di due popolazioni ma già da tre o molte più diventa, non solo scomodo (bisogna ripetere n -volte il test), ma anche inefficace. Il test d'ipotesi t-student che si effettua ad ogni coppia, con probabilità scelta α (livello di significatività) di incorrere in un errore di prima specie², presenta una probabilità di $1 - \alpha$ sul singolo test di accettare l'ipotesi nulla (fattore non significativo); ma la stessa probabilità vista sulla totalità dei test vale

$$P_{tot} = (1 - \alpha)^n \quad (3.1)$$

dove n è il numero di test. All'aumentare di n quindi, cresce la probabilità complessiva che almeno uno dei confronti si dimostri significativo per pura casualità (errore di prima specie, α_{tot} cresce):

$$\alpha_{tot} = 1 - P_{tot} \quad (3.2)$$

Nell'analisi della varianza, con apparente paradosso dei termini, il confronto è tra due o più medie. Essa permette il confronto simultaneo tra esse, mantenendo invariata la probabilità α complessiva prefissata.

Per spiegare la logica della tecnica ANOVA si riporta al lettore l'esempio più semplice con singolo fattore.

L'analisi della varianza è fondata sugli effetti additivi dei vari fattori considerati. Nel modello più semplice, che considera un solo fattore a due o più livelli, ogni singola osservazione X_{ij} può essere scritta come

$$X_{ij} = \mu + \alpha_j + \epsilon_{ij} \quad (3.3)$$

in cui:

- μ è la media generale, che definisce la dimensione dell'esperimento;
- α_j è l'influenza dell' j -esimo livello;

¹sono i valori imposti al fattore che si sta analizzando. Per ogni livello è opportuno effettuare più misurazioni, dette repliche.

²Ovvero nel caso in cui si rifiuti l'ipotesi nulla (la risposta è indipendente dal fattore) quando invece questa è vera .

- ϵ_{ij} è il residuo o errore sperimentale (E' importante ricordare che errore non è sinonimo di sbaglio, ma indica l'effetto di uno o più fattori sconosciuti, comunque non valutati o non controllati nell'esperimento).

La ANOVA effettua sostanzialmente un test d'ipotesi, questa volta con la distribuzione di Fisher, in cui ipotesi nulla ed alternative sono rispettivamente:

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \\ H_1 : \mu_i \text{ non sono tutte uguali} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Prima dell'applicazione di questo test, occorre verificare se ne esistono le condizioni. Gli errori ϵ_{ij} devono:

- essere tra loro indipendenti;
- essere distribuiti normalmente;
- avere le varianze omogenee tra i vari gruppi di livelli.

L'indipendenza degli errori comporta che la variazione casuale di ogni osservazione non sia influenzata da quella di un'altra.

Devono essere **distribuiti normalmente** in quanto la curva di Gauss (detta anche curva degli errori) è la più usata per spiegare gli errori casuali di una misurazione. La curva normale ha come assunzione base infatti quella che ogni errore o deviazione di un'osservazione sperimentale è dovuta alla somma degli effetti di un gran numero di cause indipendenti.

L'omogeneità della varianza, per cui i diversi gruppi dei quali si confrontano le rispettive medie devono avere tutti la stessa varianza vera (σ^2), è indispensabile per non determinare perdite nell'informazione sull'effetto dei vari livelli.

Dopo l'analisi dei dati per la verifica delle condizioni di validità, la metodologia dell'analisi della varianza prevede il calcolo delle seguenti quantità:

- deviazione totale con i suoi gradi di libertà (gdl);
- deviazione tra i livelli con i suoi gdl e relativa varianza;
- deviazione entro i livelli con i suoi gdl e relativa varianza.

Si riporta la tab. 3.1 seguente per il calcolo dei diversi valori, dove si tiene conto di n come numero totale di prove sperimentali, p il numero di livelli, e \bar{X} e \bar{X}_j media totale e media sul livello j -esimo rispettivamente.

Se è vera l'ipotesi nulla, i dati dei vari livelli sono estratti casualmente dalla stessa popolazione. La varianza tra le medie dei livelli e la varianza entro ogni livello dipendono dalla variabilità esistente tra i dati: varianza fra (MS_F) e varianza entro (MS_E) sono due stime indipendenti della stessa varianza vera σ^2 e quindi dovrebbero avere statisticamente lo stesso valore.

Tabella 3.1: tabella riassuntiva delle devianze, gdl e varianze utili al calcolo ANOVA.

	devianza	gdl	varianza
totale	$SS_{tot} = \sum_j^p \sum_i^n (X_{ij} - \bar{X})^2$	$n - 1$	
tra i livelli	$SS_F = n_i \cdot \sum_j^p (\bar{X}_j - \bar{X})^2$	$p - 1$	$MS_F = \frac{SS_F}{p-1}$
entro i livelli	$SS_E = \sum_j^p \sum_i^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2$	$n - p$	$MS_E = \frac{SS_E}{n-p}$

Il test di Fisher si fonda quindi sul rapporto:

$$F_{(p-1),(n-p)} = \frac{MS_F}{MS_E} \quad (3.5)$$

e sarà ritenuto significativo (fissato un certo valore α) se:

$$\begin{aligned} F_{(p-1),(n-p)} &> F_\alpha \\ & \text{o} \\ P_{Value} &< \alpha \end{aligned} \quad (3.6)$$

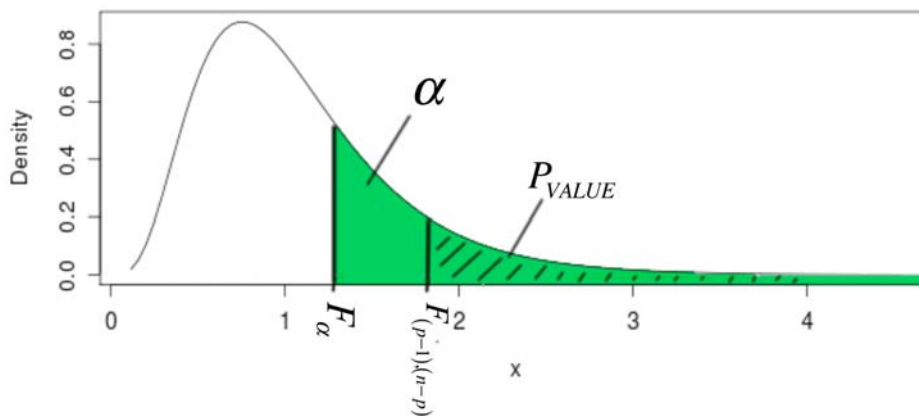


Figura 3.1: Distribuzione di Fisher con un esempio di test d'ipotesi

3.2 Regressione lineare

Individuati i parametri che sicuramente influenzano la risposta, è utile ricavare come la influenzino. È vantaggioso infatti poter ottenere un modello matematico del generico processo di trasformazione di un input in output per permetterne la migliore configurazione e l'ottimizzazione.

La relazione matematica più semplice tra due variabili³ (con X variabile indipendente e Y variabile dipendente) che sia possibile definire è la regressione lineare semplice, rappresentata dall'equazione (3.7)

$$\hat{Y}_i = a + bX_i \quad (3.7)$$

³come per l'ANOVA è più semplice analizzare il caso ad un parametro per meglio comprendere i meccanismi logici di questa tecnica statistica.

dove

- \hat{Y}_i è il valore stimato o predetto per il valore X dell'osservazione i ;
- X_i è il valore empirico di X della stessa osservazione i ;
- b è il coefficiente angolare: indica la quantità unitaria di cui cambia Y al variare di una unità di X .

I due parametri a e b sono tra loro indipendenti.

La fig. 3.2 evidenzia:

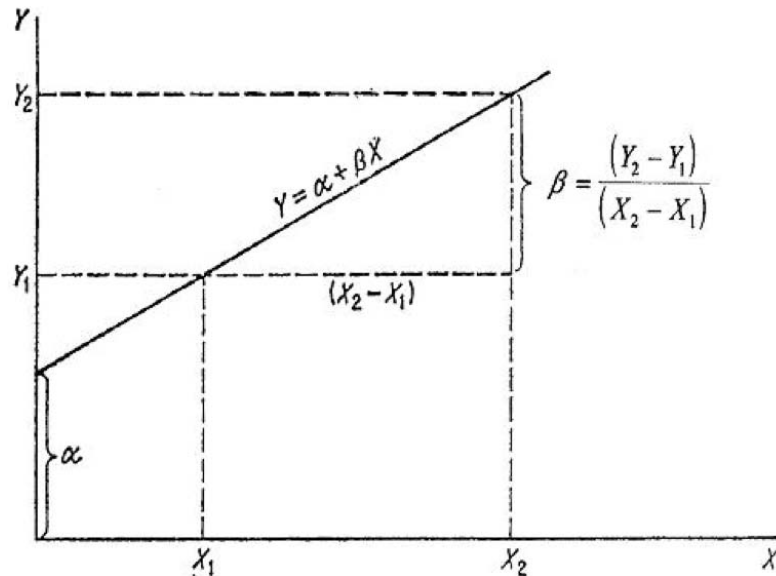


Figura 3.2: Retta di regressione lineare semplice

- il termine a , chiamato intercetta e indicato con α quando riferito alla popolazione, fissa la posizione della retta rispetto all'asse delle ordinate;
- il termine b , coefficiente angolare e indicato con β quando riferito alla popolazione, indica l'aumento di Y al cresce di X .

Un generico punto Y_i è individuato dall'equazione (3.8)

$$Y_i = a + bX_i + e_i \quad (3.8)$$

È evidente la presenza di un errore, o meglio residuo, e_i , ovvero lo scarto fra la stima \hat{Y} ed il valore misurato Y .

Per costruire la retta che distribuisce i punti, il principio a cui in questa sede si è fatto riferimento è quello dei minimi quadrati ma esistono anche altri metodi.

Il metodo dei minimi quadrati riduce al minimo la somma dei quadrati degli scarti. Ovvero, essendo

$$\sum e_i^2 = \sum [Y_i - (a + bX_i)]^2 = \text{minimo} \quad (3.9)$$

ne si fa la derivata rispetto ai coefficienti a e b e lo si pone uguale a zero:

$$\frac{\partial e}{\partial a} = 2Na + 2b \sum X_i - 2 \sum Y_i = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial e}{\partial b} = 2b \sum X_i^2 + 2a \sum X_i - 2 \sum Y_i X_i = 0 \quad (3.11)$$

quindi si ricavano:

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (3.12)$$

$$b = \frac{\sum (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.13)$$

dove \bar{X} e \bar{Y} sono le medie dei campioni misurati.

Come per l'analisi della varianza, anche in questo caso bisogna verificare i residui circa:

- la loro distribuzione normale;
- l'omogeneità delle varianze;
- l'indipendenza:

Ovviamente non sarà necessario effettuare queste verifiche qualora i fattori analizzati siano già stati studiati nell'ANOVA.

Nella regressione è di fondamentale importanza compiere ulteriori controlli:

- significatività del modello (anche in questo caso non necessario se si è fatta precedentemente ANOVA);
- significatività dei singoli fattori;
- coefficiente di correlazione;
- test del Lack of fit.

3.3 Parametri, vincoli ed obiettivi

La realizzazione fisica di un prototipo restringe la moltitudine di soluzioni ottenibili ma conserva, per sua natura, una estrema flessibilità e possibilità di regolazioni. Si esplicitano così vincoli e variabili che delimitano il lavoro dell'ottimizzazione in una precisa area di soluzioni per il raggiungimento degli obiettivi.

Si riporta qui di seguito l'elenco delle variabili con cui ci si è dovuti confrontare:

Comandi della opti-Star

- aria di supporto. Fa parte dell'unità venturi;
- aria di convogliazione. Fa parte anch'essa dell'unità venturi;
- aria di risciacquo;
- percentuale-polvere;
- voltaggio;
- amperaggio;

Regolazioni del prototipo

- altezza pistola dal manufatto;
- corsa della pistola;
- velocità del reciprocatore con la pistola;
- velocità longitudinale pannello;

caratteristiche della polvere

- distribuzione granulometrica della polvere;
- forma delle particelle di polvere;
- peso specifico polvere.

I primi quattro parametri sono fra i più fondamentali e sono tutti gestibili dall'unità di controllo della pistola corona, l'Opti-Star CG07; il secondo gruppo, come indicato, riguarda le possibili modifiche impostabili al prototipo quindi, nell'ultimo gruppo, le caratteristiche della polvere.

Molte di queste variabili potranno essere direttamente controllate mentre le restanti contribuiranno ad accrescere la componente di disturbo che si dovrà regolare.

Come si accennava poc'anzi, la flessibilità del sistema prototipo è limitata da altri fattori, detti vincoli:

- velocità di avanzamento longitudinale sarà di circa $1m/min$ imposta dalla capacità produttiva richiesta dal cliente;
- i rapporti di riduzione dai motori agli utilizzatori (tappeto o reciprocatore) sono fissi. La velocità massima regolabile dagli inverter non potrà andare oltre i valori di 50Hz (frequenza di rete).

È chiaro ovviamente che questi limiti sono tutti causa di precise scelte fatte in fase di realizzazione del prototipo figlio di vincoli ed obiettivi superiori imposti dalle richieste della commessa.

Non resta che delineare gli obiettivi, motore principale della ricerca:

- spessore di polvere depositata compreso fra i 60 e gli $80\mu m$;
- spessore depositato uniforme su tutta la superficie del pannello con particolare attenzione agli spigoli;
- se possibile, ridurre sempre l'over-spray.

L'ultimo punto è un aspetto di secondo piano rispetto agli altri due in quanto non interferisce eccessivamente con la qualità del prodotto finito verniciato a polvere UV-indurente che è lo scopo principale per cui questi studi son stati fatti; è da ritenersi però estremamente importante dal punto di vista dell'ottimizzazione: un'efficienza di trasferimento elevata permetterebbe l'eliminazione dei sistemi di recupero dell'over-spray. Ne guadagnerebbero:

- il costo iniziale dell'investimento (meno unità necessarie);
- i tempi di mancata produzione per blocco dell'impianto, causa pulizia cabina ad ogni cambio polvere, necessaria se non si vuole inquinare la polvere recuperata con altri colori;
- anche la qualità. La distribuzione di granulometria è importantissima ed è evidente che il recupero mischi polveri nuove e controllate dalla fabbrica, con quelle recuperate ed inevitabilmente degradate.

3.4 Problematiche della verniciatura elettrostatica

La verniciatura elettrostatica presenta dei tipici comportamenti nella fase di applicazione già ampiamente trattati nella letteratura dedicata a questo settore. L'esperienza è già maturata per molti aspetti ed è importante rianalizzarli per aiutarci a trovare le prime regolazioni ottimali. È grazie a questo che molte delle variabili qui presentate sono state impostate seguendo "l'approccio a tentativi" di cui si è parlato all'inizio del capitolo. Per meglio analizzare questi aspetti e problematiche della verniciatura elettrostatica si seguirà il percorso che la polvere compie a partire dalla pistola fino al manufatto.

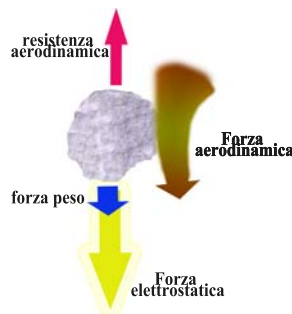


Figura 3.3: Forze che influenzano un particella di polvere carica

La polvere in uscita dalla pistola è subito soggetta alle forze evidenziate in fig. 3.3. Nella prima fase, la forza aerodinamica la fa da padrona, spingendo violentemente le particelle lontano dalla pistola. In prossimità del pezzo la polvere viene attratta dal forte campo elettrico che la mantiene successivamente attaccata. La natura non conduttiva delle particelle di polvere, gli permette di mantenere la carica senza scaricarsi, garantendo una tenuta elettrostatica sul pezzo più a lungo.

3.4.1 repulsione del primo strato di vernice e densità di distribuzione della granulometria

Il primo strato di vernice depositatosi genera una barriera repulsiva per gli strati successivi. Questo evidenzia l'importanza della **distribuzione granulometrica** della polvere, infatti è vitale che sia molto ampia, con un mix di granulometrie differenti e non troppo omogenee([2]). Guardando in sezione uno strato di vernice in polvere depositata si potrà notare infatti un aumento di granulometria sul lato esterno. Questo è dovuto al fatto che solo le particelle più grosse, e che hanno quindi più carica, si riescono ad attaccare al pezzo al di sopra di altri strati.

Secondo [6], per una verniciatura con ottimo grado di finitura, è fondamentale avere particelle sottili ($10\mu m$ di diametro). Di contro però, una distribuzione di granulometrie sottili troppo stretta presenta ben tre contronidicazioni:

- la polvere è difficilmente fluidificabile nel serbatoio a letto fluido perchè tende a creare grumi;
- come spiegato poc'anzi, non permetterebbe il deposito di un adeguato strato di polvere;
- causerebbe, con l'utilizzo di pistole corona, un verificarsi anticipato della back-ionization che ridurrebbe ulteriormente la quantità di polvere depositata.

Le particelle fini sono caratterizzate da un alto rapporto carica su peso e sono quindi più soggette al fenomeno della ionizzazione all'indietro (back-ionization).

3.4.2 Back-ionization

La ionizzazione all'indietro è il principale processo che limita l'accumulo infinito di polvere nel caso si stia utilizzando il sistema corona.

Quando si sono accumulate abbastanza particelle cariche sul manufatto, queste creano un secondo campo elettrico (il principale è quello generato dalla pistola a corona) fra loro ed il pezzo. Ciò provoca la ionizzazione delle particelle di aria intrappolate all'interno dello strato di polvere. Processo del tutto simile al sistema di carimento corona. In conseguenza di questo intenso flusso di elettroni, si sviluppano strisce di luce come scintille, che attraversano lo strato di vernice in polvere.

All'interno di ogni scintilla viaggiano elettroni negativi e ioni positivi in opposte direzioni.

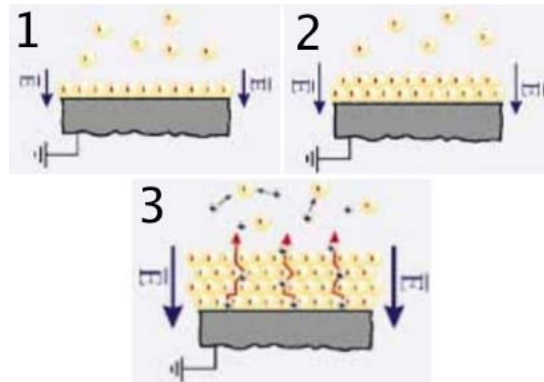


Figura 3.4: back-ionization

Durante l'effetto della back-ionization, come mostra la fig. 3.4, gli ioni positivi che fuoriescono dallo strato di polvere depositata collidono con le particelle di polvere negative in arrivo. Il risultato è che le scaricano non permettendone l'attacco al pezzo.

3.4.3 Accumulo sui bordi e Gabbia di Faraday

Caratteristica principale del principio di caricamento ad effetto corona è quello di generare un forte campo elettrico fra la pistola ed il pezzo collegato a terra.

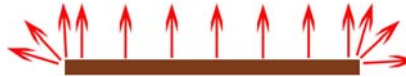


Figura 3.5: Linee di campo di un pannello sono l'effetto di pistola corona

In fig. 3.5 sono evidenziate le linee di campo elettrico che si generano sul pannello da verniciare sotto l'azione della forte differenza di potenziale dell'elettrodo della pistola. Si evince come queste siano disposte perpendicolarmente al pezzo ma, ciò che più ci interessa, è evidenziare come sugli spigoli ci sia un addensarsi di linee. Le particelle di polvere con carica opposta al pannello ne saranno attratte e ne seguiranno le traiettorie. Gli spigoli saranno sempre soggetti ad accumulo di vernice. Nei dovuti limiti, questa è una problematica poco sentita nella verniciatura tradizionale a polvere ma in quella UV rappresenta uno dei punti più fondamentali a garantire buona reticolazione. Gli spigoli sono anche un punto di moltiplicazione delle azioni interne, risulta a maggior ragione indispensabile avere anche una vernice dura e resistente.

Il campo elettrico che tanto rende vantaggiosa ed efficiente la tecnologia corona è causa anche di altri ostacoli, la Gabbia di Faraday.

L'effetto della gabbia di Faraday presuppone la presenza di un contenitore elettricamente conduttore in grado di isolare l'ambiente interno. È di solito un fenomeno positivo se si pensa che è lo stesso principio di protezione adoperato dai parafulmini

o, in ambiente medico, per le stanze di risonanze magnetiche dove è utile circoscrivere gli effetti elettromagnetici. In verniciatura invece è tutt'altro che ben accetto.

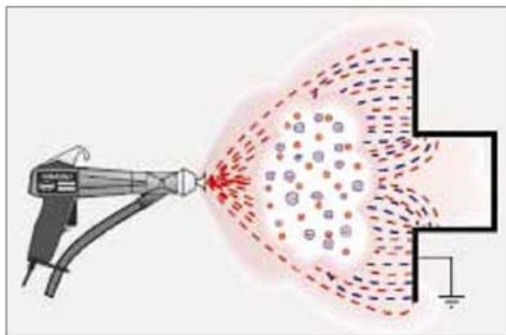


Figura 3.6: Effetto della gabbia di Faraday e cavità non raggiunta dalla vernice

Le cavità o canali che si possono presentare sul pezzo da verniciare sono le principali parti che subiscono l'effetto della Gabbia di Farady. Il campo elettrico infatti segue la traiettoria di più bassa resistività verso la messa a terra (per esempio i bordi di tali recessi). Quindi con la massima concentrazione del campo elettrico sui bordi di un canale, la deposizione della polvere sarà molto accresciuta in queste zone (come spiegato all'inizio del paragrafo) dove lo strato di vernice in polvere aumenterà molto rapidamente ma lasciando queste due problematiche:

- meno particelle hanno la possibilità di entrare nei recessi perché le particelle di polvere sono spinte fortemente dal campo elettrico verso i bordi della gabbia di Faraday;
- gli ioni liberi, generati dal sistema corona, seguiranno le linee di campo verso i bordi, satureranno rapidamente lo strato esistente con cariche aggiuntive, e porteranno a un rapido sviluppo di Back ionization.

3.5 Controllo parametri Opti-Star, le prime regolazioni

Come esposto nel paragrafo 3.3, molti parametri sono gestiti dall'unità di controllo della pistola corona, l'Opti-Star CG07.

Dal'interfaccia digitale (fig. 3.7), è possibile regolare:

- A1. la percentuale di polvere 0-100%;
- A2. aria totale $1,0-4,0m^3/h$. Consente regolazioni sull'aria di convogliazione e di supporto;
- A3. amperaggio dell'elettrodo;
- A4. voltaggio dell'elettrodo;

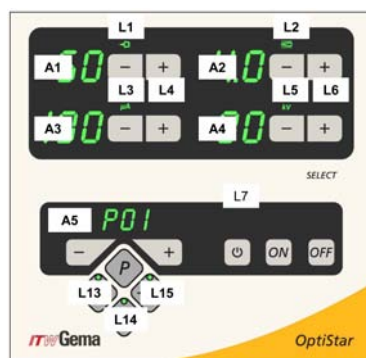


Figura 3.7: Immagine frontale dell'unità di comando Opti-Star CG07

lo schermo A5 visualizza il programma presalvato che si sta utilizzando. Con pressione continua su alcuni pulsanti è possibile raggiungere altre regolazioni di numerosi parametri. Sostanzialmente però la pistola corona e la sua interfaccia di controllo permettono di comandare due aspetti:

- la carica elettrica sull'elettrodo;
- la quantità di polvere erogata.

3.5.1 Carica dell'elettrodo

Le moderne pistole a spruzzo elettrostatico di polvere con metodo corona hanno un attento controllo sulla differenza di potenziale e la corrente cedute all'elettrodo. Un sistema elettronico, detto Automatic Current Control (ACC), fa proprio questo ([7]). Si basa sull'automatico adattamento del voltaggio della pistola per mantenere la corrente della pistola e la forza del campo, tra la pistola e la parte ad un certo livello ottimale.

Per capire perché l'ACC porta miglioramenti nel processo di verniciatura a polvere è importante tenere presente la legge di Ohm ($V = I \cdot R$) e la curva caratteristica dell'apparecchiatura per applicazione della polvere utilizzata.

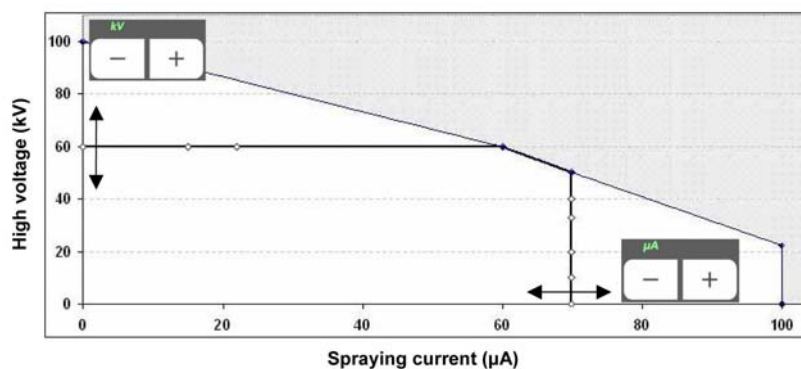


Figura 3.8: Curva caratteristica della pistola Corona utilizzata.

Come è evidente in fig. 3.8, la pistola ha una prestabilita area di lavoro; e così se si lavora a 60 kV non si potrà andare oltre i 60 μA . Il limite è tenuto

strettamente sotto controllo dall'ACC che interviene abbassando la tensione in caso di maggiore assorbimento. **La distanza dal pezzo** da verniciare è un parametro che entra così in gioco con la legge di Ohm. Più ristretta è la distanza, più bassa sarà la resistività dell'aria interposta permettendo di scaricare una maggior corrente (infatti sarà maggiore il numero di ioni liberi generato dal processo corona).

Il controllo di questo fenomeno, non è solo per gestire il consumo di potenza, ma prima di tutto per ottimizzare l'efficienza di trasferimento.

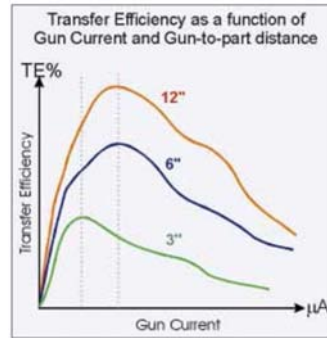


Figura 3.9: Relazione tra l'efficienza di trasferimento (in percentuale polvere che ha aderito al pezzo rispetto alla totale erogata) e la corrente della pistola

Dalla fig. 3.9 si evidenzia che quando la pistola è a 3,6 o 12 pollici (8, 15 e 30cm circa) la massima efficienza di trasferimento si ottiene a differenti livelli di corrente. Il sistema ACC provvede ad adeguare i parametri elettrici dinamicamente semplificando la necessità di ulteriori regolazioni da parte del tecnico.

Tornando al caso specifico del prototipo qui descritto, l'utilizzo di una superficie pressoché piana ha ulteriormente agevolato il compito, permettendo di tralasciare i fattori voltaggio e amperaggio. Si è così impostato un valore molto alto di tensione pari a 90kV per aumentare l'efficienza di trasferimento tranquilli di non incorrere in Gabbia di Farady. L'altezza dal manufatto, anch'essa strettamente correlata con la carica elettrica come si è visto, non è stata oggetto di ulteriore studio ma la si è mantenuta costante a 20cm. Quest'ultimo valore è un dato consigliato di fabbrica per le pistole e ha evidenziato nelle prove fatte anche un buon equilibrio fra:

- l'essere troppo basso (pistola vicina) che causa la difficile omogeneità di distribuzione, lasciando ben visibili le tracce più marcate di dove è passata la pistola;
- l'essere troppo alto (pistola lontana) che genera un'eccessiva dispersione del flusso e crollo dell'efficienza di trasferimento, con la polvere che viene attratta dalle pareti della cabina polveri più tosto che dal pezzo.

3.5.2 Quantità di polvere erogata

Gli altri parametri che la pistola permette di regolare servono tutti alla modulazione della quantità di polvere da erogare. Prima però di analizzarli da vicino, è

consigliabile studiare più nel particolare il sistema di aspirazione a venturi, l'unità fondamentale che genera il flusso.

L'effetto venturi è figlio della semplice equazione di Bernoulli

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{costante} \quad (3.14)$$

(con P pressione, ρ densità del fluido e v velocità) che dice come all'aumentare della componente cinetica, diminuisce la pressione.

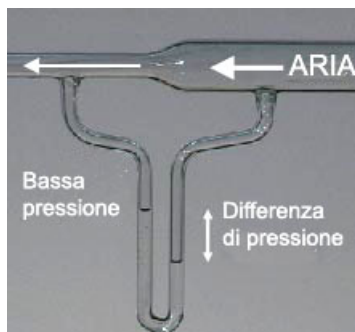


Figura 3.10: Effetto venturi generato da un flusso d'aria accelerato

Il sistema usato per aspirare la polvere dal serbatoio a letto fluido ed incanalarla quindi nei tubi non fa nient'altro che questo (vedi fig. 3.11). L'aria di convogliazione (conveying air) viene fatta accelerare con una strozzatura del tubo (booster nozzle) progettata affinché la pressione statica raggiunta sia inferiore a quella atmosferica, avviando l'aspirazione dal tubo di pescaggio (suction tube) della polvere fluidificata.

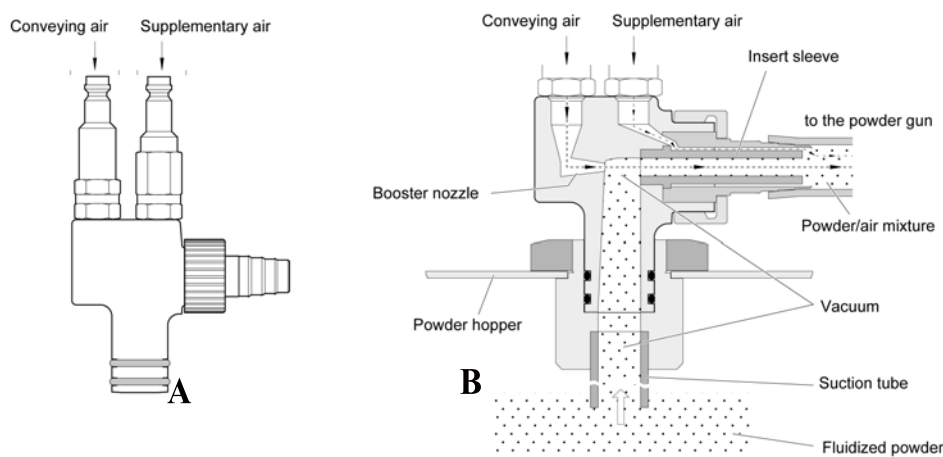


Figura 3.11: Unità venturi della ITWGema. A unità completa. B unità vista in sezione

Il sistema è già così completo ma, come è possibile notare in fig. 3.11, un secondo flusso d'aria viene immesso solo successivamente alla zona di aspirazione (supplementary air).

Esperienza di ITWGema nel campo ha dimostrato che per il trasporto di particelle solide all'interno di tubi è necessario garantire una minima portata volumetrica

d'aria. Per tubi di 11mm come in questo caso, il valore è di circa $4\text{m}^3/\text{h}$ di portata. Qualora si voglia diminuire la quantità di polvere assorbita, bisognerà ridurre la portata d'aria di convogliamento anche sotto la soglia critica, causando la generazione di un flusso irregolare, cosiddetto effetto "pumping". È proprio per questo che si usa l'aria di supporto (supplementary air) che permette di apportare nel tubo quella differenza necessaria a mantenere i $4 - 5\text{m}^3/\text{h}$ di portata.

Si è sviluppato un modello grafico dai dati tabellati del manuale dell'unità Opti-Star al fine di riassumere l'enormità di variabili che è possibile impostare, mettendone più in luce le interazioni e cogliendone l'influenza nella loro interezza sul flusso di polvere.

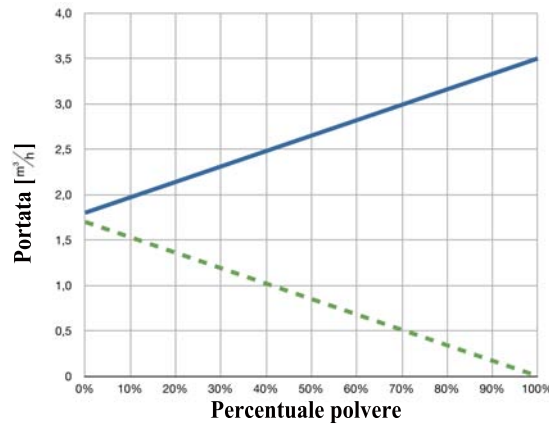


Figura 3.12: Grafico dell'andamento dell'aria di convogliamento (linea continua) e dell'aria di supporto (linea tratteggiata) al variare della regolazione digitale sulla percentuale-polvere. $C_0 = 1,8\text{m}^3/\text{h}$; $C_1 = 100\%$; $P_9 = 0\text{m}^3/\text{h}$

Le equazioni a cui il grafico di fig. 3.12 fa riferimento sono:

$$\text{conveying air} : A_C = (A_{TOT} - C_0) \cdot PV_{\%} \cdot C_1 + C_0 \quad (3.15)$$

$$\text{supplementary air} : A_S = (A_{tot} - A_C) + P_9 \quad (3.16)$$

Come evidente, le variabili sono numerose e sono:

- A_{TOT} aria totale, che è possibile variare in un range che va tra 3 e $6,5\text{m}^3/\text{h}$;
- $PV_{\%}$ percentuale-polvere, è un altro principale comando della Opti_Star. Regolabile tra 0 e 100%;
- C_0 fattore di correzione della minima portata, è un comando che garantisce il valor minimo di portata dell'aria di convogliamento. Lavora su di un range fra i $0,5$ e i $3\text{m}^3/\text{h}$;
- C_1 fattore equilibratore, è un comando utile quando si hanno più pistole (ci sarà un Opti-Star per ciascuna) che lavorano. Permette di omogeneizzare le

diverse portate di polvere, probabilmente rese differenti a causa di lunghezze tubi differenti. Regolabile da 0 a 100%;

- P_9 fattore di compensazione per l'aria di supporto, è una regolazione aggiuntiva, utile nell'apportare un'ulteriore portata d'aria alla supplementary air. Il range va da 0,0 a 4,0 m^3/h .

Tranne che per la $PV\%$, le altre variabili servono soprattutto per una taratura di partenza del sistema. La loro impostazione è soprattutto dettata dalle perdite di carico funzione di diametro dei tubi utilizzato e loro lunghezza, oltre eventuali strozzature o eccessive pieghe. Le equazioni qui esplicitate agevolano questo compito, garantendo una veloce messa a punto in sede di installazione di nuovi impianti.

Il caso del prototipo da noi sviluppato ha seguito le impostazioni standard. Al fine di non accrescere troppo la variabilità, si sono fatte tubazioni corte (sotto i 10m) e di dimensioni prescritte (diametro 11mm) da manuale, permettendoci di usare le impostazioni consigliate di fabbrica.

Sempre per ridurre il lavoro sperimentale, e concentrarlo solo su ciò che ci è di più interesse, si è adottato l'approccio un-fattore- alla-volta e si sono visti gli effetti sulla quantità di polvere distribuita, al variare dell'aria totale

<i>Aria totale</i>	3,5
C_0	1,8
C_1	100%
P_9	0

Tabella 3.2: Impostazione valori Opti-Star

L'unico parametro, di cui si sono studiati gli effetti sulla variazione di spessore ceduto sul manufatto, è stata la regolazione digitale sulla percentuale di polvere. È sempre grazie alle eq. 3.15 e 3.16 che si è potuto tenere sotto controllo la correlazione con le altre variabili pneumatiche.

3.6 Le misure

L'attività sperimentale è stata svolta a valle della messa a punto di prototipo e parametri generali della pistola quali quelli al paragrafo precedente. Sono state effettuate diverse prove prima della registrazione e analisi dei primi dati al fine di ridurre, per quanto possibile, rumore ed interferenze di ogni genere.

La flessibilità del prototipo ha permesso la variazione di caratteristiche come velocità di avanzamento e tempi di accensione, interfacciandosi con il computer al blocco PLC o intervenendo manualmente sugli inverter.

Si può suddividere il lavoro svolto in due gruppi:

- influenza delle velocità e forma della distribuzione;

- influenza del cambio colore e della percentuale-polvere sullo spessore.

3.6.1 Gli strumenti di misura

Il riferimento principale di questi studi è stato quello di misurare la quantità di polvere e la sua distribuzione, uno spessimetro per vernici ha rappresentato così il principali nostro aiuto. Non si aveva strumenti più sofisticati a disposizione nè automatici per controllare dinamicamente gli spessori ma è tutto più che sufficiente per gli obiettivi preposti.



Figura 3.13: Spessimetro per vernici. Sono visibili i due sensori per substrati ferrosi e non ferrosi

Questo tipo di spessimetri permette (vedi fig. 3.13) la rilevazione fino al decimo di micrometro dello spessore della vernice, materiale isolante, interposto fra il sensore dello strumento ed il materiale conduttivo di cui è fatto il manufatto.

Il principio di funzionamento è basato sul principio dell'induzione magnetica o delle correnti indotte a seconda che il materiale sia ferromagnetico o paramagnetico. È evidente che non può funzionare per manufatti in legno o plastica ma per il caso di pannelli sandwich è perfetto infatti questi sono esternamente di ferro o alluminio.

I materiali ferromagnetici hanno la caratteristica di magnetizzarsi sotto l'azione di un campo magnetico e hanno un valore di permeabilità magnetica (μ) molto alto. Lo spessimetro, come anche i sensori di prossimità, riescono a leggere l'intensità dell'induzione magnetica (\vec{B}) generata che sarà funzione della distanza a cui si trovano e dell'intensità della forza magnetomotrice ($f.m.m.$). La fig. 3.14 rappresenta in maniera molto schematica il principio matematico di fondo.

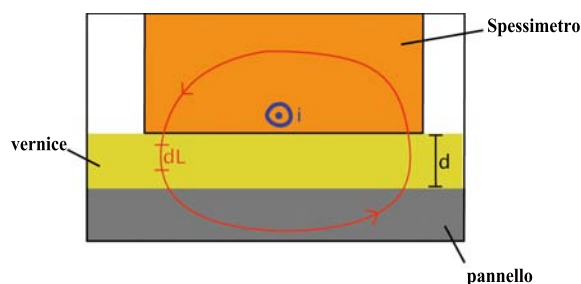


Figura 3.14: Sistema di lettura di uno spessimetro a induzione magnetica

Ovvero dalla legge di Ampere:

$$N \cdot i = \oint H dL = \oint H dL_{\text{vernice}} + \oint H dL_{\text{pannello+spessimetro}} \quad (3.17)$$

ma la formula si può semplificare in quanto il campo è tutto "assorbito" dalla parte in vernice. Questa ha una permeabilità magnetica molto bassa contro spessimetro e pannello che sono invece in ferro, quindi:

$$N \cdot i \simeq \oint \frac{\vec{B}}{\mu_{\text{vernice}}} dL_{\text{vernice}} = H \cdot 2d \longrightarrow d = \frac{Ni}{2H} \quad (3.18)$$

Per il materiali paramagnetici questo sistema non può funzionare a causa della non elevatissima permeabilità. Si adotta quindi il metodo delle correnti indotte.

Un circuito primario all'interno del sensore a corrente alternata, induce un campo magnetico tempo variante. La variazione di flusso magnetico genera così una forza elettromotrice (*f.e.m.*) che, nel materiale paramagnetico, causa lo sviluppo di correnti indotte anch'esse tempo varianti. Il circuito secondario sviluppa a sua volta un campo magnetico, il suo flusso andrà a concatenare il circuito primario causandone una caduta di tensione facilmente misurabile.

L'equazione d'equilibrio sul circuito primario sarà infatti:

$$V = R \cdot i_1 + L \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (3.19)$$

dove L sta per autoinduttanza ed M sta per mutua indotta.

I materiali ferromagnetici, con permeabilità alta, generano una caduta di potenziale nella mutua induttanza molto bassa con conseguente difficoltà nella lettura. Per tale motivo, gli spessimetri vengono forniti di due sensore dedicati per materiali ferromagnetici o non ferromagnetici (vedi fig. 3.13).

Una difficoltà riscontrata è stata quella di dover prendere misure, non su uno strato rigido di vernice, ma sulla polvere ancora in granelli e non reticolata. Questa è stata una scelta quasi obbligata che ci ha permesso di fare più prove sperimentali, variando più volte le polveri utilizzate e il parametro percentuale-polvere. L'alternativa sarebbe stata infatti quella di operare tutto il processo di verniciatura, applicazione-fusione-reticolazione, per ogni set di parametri, facendo non solo elevare enormemente i costi ma inevitabilmente ridurre il numero di dati campionati oltre che favorire l'ingresso di altre variabili che riguardo le altre fasi del processo. Il costo della scelta è stato pagato in termini di maggiore errore di misura che si è imparato però a controllare, migliorando sicuramente la tecnica di registrazione del dato per la parte sistematica, ed aumentando le misure per la parte casuale.

L'unica ulteriore accortezza che si è dovuto adottare è stata quella di non poter prendere misure sempre sullo stesso punto in quanto dopo il primo passaggio la polvere



Figura 3.15: Parte di pannello segnata con nastro adesivo per delimitare la zona di misura.

risulta schiacciata o spostata; è stata necessario quindi creare una zona più ampia dove poter leggere lo spessore in punti prestabiliti (vedi fig. 3.15).

Per ogni punto (indicati con le lettere A, B, C, \dots) è stata presa la misura dello strato di vernice bianca già presente, così da poter esser sottratto al valore successivamente letto con lo strato di polvere depositato.

3.6.2 Cambio colore e percentuale-polvere

Dell'intera attività di sperimentazione svolta, è questa la parte a cui è stata dedicata maggiore attenzione. La definizione di un modello matematico semplice che permettesse un'immediata regolazione dello spessore mediante la regolazione del solo parametro percentuale-polvere, prevedendo possibili influenze dovute ad un cambio colore, è stato ritenuto di rilevante importanza. La principale motivazione è stata quella di riuscire a consegnare maggiore rigore all'argomento solitamente lasciato a regolazioni imprecise fatte "ad occhio", soprattutto se si pensa agli impianti tradizionali.

L'approccio è stato di tipo fattoriale, stando attenti nel calcolo di tutte le possibili combinazioni dei due parametri e dei loro diversi livelli scelti.

Il numero di dati sperimentali usati è stato di ben cinque differenti regolazioni di percentuale-polvere confrontati con quattro differenti polveri, dieci repliche per ognuna delle venti possibili combinazioni. Il totale è di 200 numeri tabellati su cui si sono basati tutti gli studi e a cui non sono state contate altrettante misure compiute in fase di regolazione e preparazione.

Le polveri sono della Akzo Nobel Francia, multinazionale del settore. I diversi colori usati e la loro combinazione con il fattore percentuale-polvere sono specificati in tab. 3.3.

Tipo polvere	Perc.-polvere	Tipo polvere	Perc.-polvere
CANON	30%	RAL 6021	30%
	40%		40%
	50%		50%
	60%		60%
	70%		70%
RAL 7016	30%	RAL 1015	30%
	40%		40%
	50%		50%
	60%		60%
	70%		70%

Tabella 3.3: Fattori e relativi livelli scelti

In fase di analisi ANOVA non è necessario fornire un valore numerico al fattore in quanto ne viene rilevata solo l'influenza o meno sulla risposta. Nel caso analizzato, il tipo polvere era questo fattore.

Prima dell'analisi quantitativa, è comodo evidenziare un andamento qualitativo grazie al grafico detto d'interazione, qui di seguito (vedi fig. 3.16).

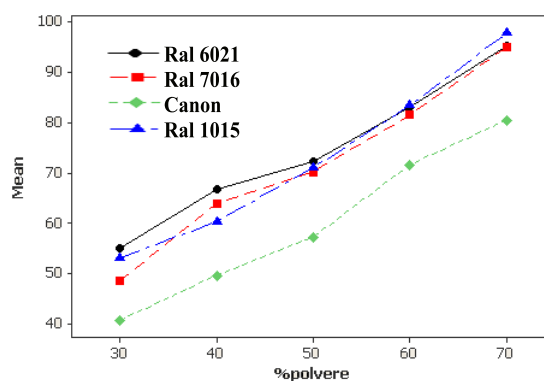


Figura 3.16: Interaction plot per percentuale-polvere e tipo polvere

Fanno seguito i risultati dell'ANOVA (tab. 3.4)

Source	GDL	SS	MS	F	Pvalue
polvere	3	67.030,7	2.243,6	103,41	0,000
%polvere	4	44.715,4	11.178,9	515,25	0,000
Interaction	12	456,1	38,0	1,75	0,059
Error	180	3.905,3	21,7		
Total	199	55.807,6			

Tabella 3.4: Risultati ANOVA a due fattori. È stata calcolata anche l'interazione

Scegliendo un livello di significatività α del 5%⁴, tenendo conto che il test è stato

⁴Il livello di significatività 5% viene adottato molto frequentemente in quanto si ritiene che il rapporto 1/20 (cioè 0,05) sia sufficientemente piccolo da poter concludere che sia «piuttosto improbabile» che la differenza osservata sia dovuta al semplice caso

fatto su tre fattori (è compresa l'interazione), si confrontano i P_{value} con α di famiglia pari a

$$\alpha_{fam} = \frac{\alpha}{3} = 0,17 \quad (3.20)$$

è possibile dedurre come il cambio polvere e la regolazione perc.-polvere siano determinanti; mentre la loro interazione fortunatamente non sia influente, tutto a favore di un modello più semplice.

Le ipotesi di validità dell'analisi delle varianze sono state rispettate, si riporta qui di seguito (nei prossimi studi verrà solo riportato il risultato dei test senza grafico) le verifiche riuscite di normalità (fig. 3.17), omoschedasticità (fig. 3.18) e indipendenza dei residui (fig. 3.19).

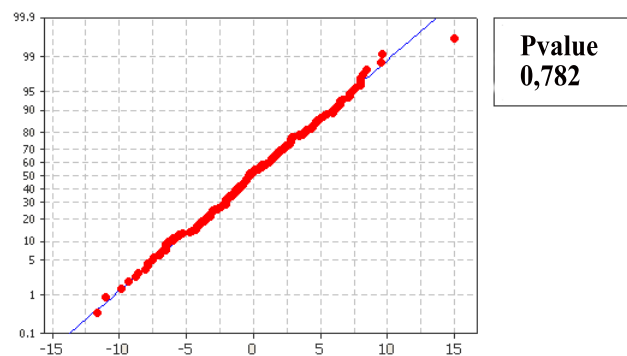


Figura 3.17: Test di normalità. Ipotesi nulla di normalità accettata per $\alpha = 5\%$

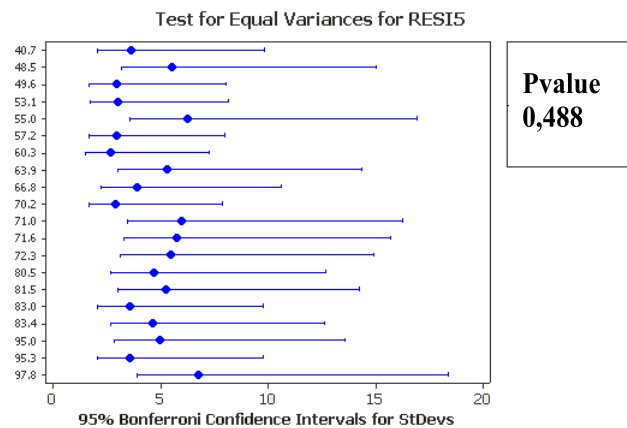


Figura 3.18: Test di omoschedasticità di Levene superato.

Prima del passaggio alla regressione si è dovuto trovare il parametro numerico che rende il cambio colore influente sullo spessore distribuito.

Granulometria, peso specifico e forma sono sicuramente fattori influenti ([8]) ma non sempre sono grandezze facilmente misurabili.

Negli studi fatti da Smith e Penney ([9]) sulla distribuzione del getto di una pistola elettrostatica la forma è ritenuta non importante in quanto le forze elettriche sono più determinanti nell'applicazione. Questi studi però non tengono conto

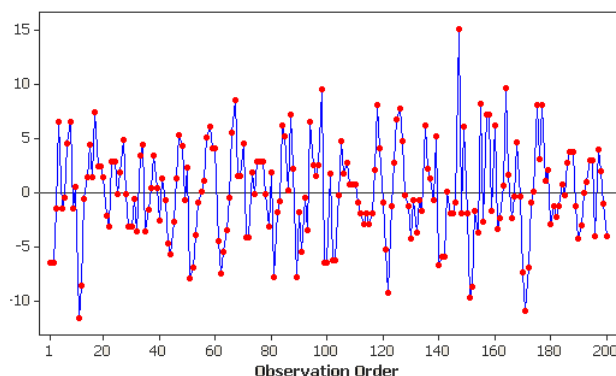


Figura 3.19: Plot dei residui in ordine temporale di osservazione per evidenziarne eventuale influenza.

dell'efficienza dell'aspirazione venturi dove le particelle di polvere non presentano ancora carica elettrica.

La misura dei grani, inoltre, è un altro fattore influente sull'aerodinamica e quindi sullo spessore di polvere anche per i motivi di cui al pragrafo 3.4.1. La sua misura però è effettuata a campione per mezzo di tecniche laser (non in nostro possesso) dalle aziende produttrici ma non è fornita l'indicazione sull'imballaggio con cui viene commercializzata e, a nostra esplicita richiesta, non è stato possibile avere le risposte desiderate.

Si è proseguito i calcoli avvalendosi del peso specifico delle singole polveri (tab. 3.5) calcolato grazie all'utilizzo di una bilancia millesimale ed un recipiente di cui si conosceva il volume.

	Canon	Ral 7016	Ral 6021	Ral 1015
$[\text{g}/\text{dm}^3]=$ $[\text{kg}/\text{m}^3]$	575,3	527,1	503,0	641,6

Tabella 3.5: Peso specifico delle polveri utilizzate

Ai primi risultati sulla regressione, il test di t-student sulla significatività del parametro peso specifico ha dato esito negativo. È evidente che la significatività calcolata con il metodo dell'analisi della varianza sul cambio colore non identifica nel peso specifico il paramtetro determinante. Lo stesso grafico di fig. 3.20 evidenzia come al variare dei valori in ascissa non ci sia un inequivocabile effetto sullo spessore: solo in corrispondenza di $575,3 \text{ kg}/\text{m}^3$ (Canon) c'è una discesa.

Non avendo a disposizione mezzi migliori ed in assenza di risposte soddisfacenti da parte della Akzo Nobel in merito alle caratteristiche di ogni polvere, si è preferito eliminare il colore Canon dai dati. Successivo studio ANOVA (si rimanda all'appendice B), in merito all'influenza dei parametri tipo polvere (senza Canon) e percentuale-vernice erogata, ha confermato l'assenza di dipendenza dello spessore al variare della polvere utilizzata. La stessa Akzo Nobel sostiene che sia solo ed esclusivamente il colore Canon in nostro possesso ad avere una imprevista diversità

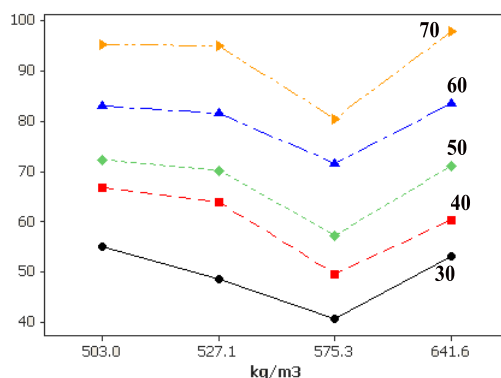


Figura 3.20: Interaction plot. sulle ordinate lo spessore e sull'ascissa il peso specifico; perc.-polvere segnata sulle linee

di distribuzione.

Con la regressione ad un fattore si spiegherà molto più nel dettaglio come la percentuale-polvere determini una variazione o meno dello spessore distribuito sul manufatto.

Si risparmia il lettore dal dover analizzare le prime regressioni ottenute (di cui potrà fare riferimento all'appendice C) perchè risultate inefficaci. Si passerà direttamente alla presentazione dei risultati ottimali. Dai prossimi calcoli risulteranno omessi infatti i dati relativi alla percentuale di polvere del 30%, in quanto presentano il test del Lack of fit negativo. Questo denuncia l'incompletezza del modello matematico, probabilmente conseguenza di misure eccessivamente influenzate da altri fattori, quali la quantità troppo bassa di polvere difficilmente misurabile con lo strumento a nostra disposizione (si accentuando le limitazioni di cui al paragrafo 3.6.1).

L'utilizzo del comando Stepwise ci ha permesso, mediante ripetuti test di t-student, di rilevare la migliore o peggiore attinenza di fattori non lineari derivati dallo spessore-polvere, quali il suo quadrato o il cubo. Il risultato ha consigliato un polinomio di secondo grado con fattore di primo grado assente.

Si riporta qui di seguito i risultati ottenuti (tab. 3.6). $L'R_{Sq}$ e $l'R_{sq}(adj)$ sono rispettivamente del 90,6% e 90,5%, valori abbastanza alti e vicini fra loro, ovvero il modello è spiegato a circa il 90% e non presenta predittori di troppo (con un solo fattore, anche se c'è la presenza della costante, è davvero improbabile che non venga soddisfatto quest'ultimo punto).

	T-Student o F-Fisher	Pvalue
<i>costante</i>	T=38,94	0,000
$(perc. - polvere)^2$	T=27,65	0,000
<i>Regressione</i>	F=764,35	0,000
<i>Lack of fit</i>	F=0,73	0,482

Tabella 3.6: Risultati Regressione

L'equazione così ottenuta è la (3.21) con una deviazione standard di $4,84\mu m$:

$$spessore = 47,184 + 0,99 \cdot Polv\% \quad (3.21)$$

dove $Polv\%$ sta per il valore compreso tra 0 e 1 dell'impostazione percentuale-polvere inseribile da comandi Opti-Star.

3.6.3 Velocità e campo d'azione della pistola

L'ulteriore analisi che si viene qui a proporre è quella dedicata a ricercare l'ampiezza dell'area del manufatto raggiunta dal getto di polvere. La possibilità di avere a disposizione un modello matematico che descriva la variazione del raggio d'azione in funzione di velocità di avanzamento, traslazione pistola e percentuale-polvere è molto utile al fine dell'accumulo sui bordi. La regolazione della corsa della pistola con l'inverter ed i sensori di prossimità, sarebbe ottimale ad ogni nuova installazione.

Fin dagli anni '70 ci sono state interessanti sperimentazioni sulle dinamiche che gestiscono la propagazione della polvere per verniciatura. Nel 1973 Golovy ([10]) pubblica i suoi studi circa l'influenza di vari parametri sulla traiettoria dei granelli di polvere (vedi fig. 3.21). Nel suo caso in particolare, fu sviluppato un esperimento con una pistola corona che spruzzava contro un manufatto di forma tonda a cui erano stati disegnati più cerchi concentrici per osservare la diminuzione di spessore depositato all'aumentare del raggio.

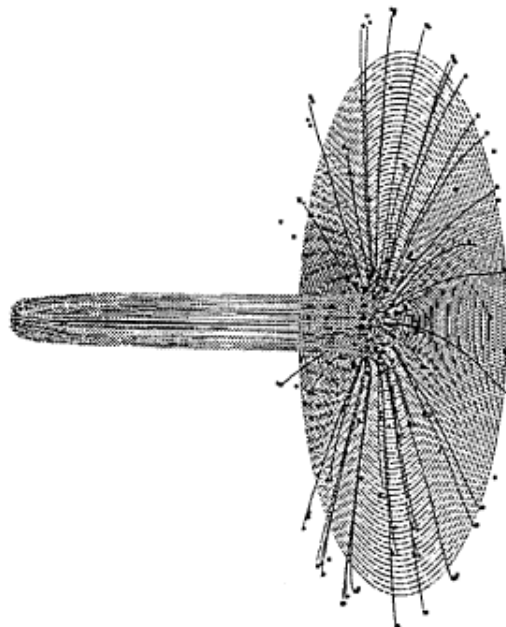


Figura 3.21: Traiettorie coperte da uno spruzzo di polvere elettrostatica

Non è stato possibile eseguire la stessa esperienza in quanto, mantenendo ferma la pistola, la polvere depositata è eccessiva per una buona misura con lo spessimetro a nostra disposizione. Inoltre, affinché il transitorio di accensione della pistola non sfalzi i risultati (effetto "pumping" prima che la pressione si stabilizzi), è necessario

mantenere acceso il flusso a lungo, con conseguente accumulo eccessivo anche a basse percentuali-polvere.

Si è pensata una soluzione più alla portata dei nostri mezzi, non per questo di minor ambizione.

L'avanzamento longitudinale del pannello sandwich è stato mantenuto attivo e costante sotto il flusso di polvere. Il movimento della pistola è stato però fermato, posizionando la stessa al centro rispetto alla linea trasversale del pannello per tutta la durata della campagna sperimentale. Quest'ultimo accorgimento è una scelta fatta affinché tutto il getto rimanesse all'interno della larghezza massima del pannello permettendoci di poter misurare il raggio massimo d'azione⁵ della pistola.

A questo punto si sono fatte due campagne sperimentali con due studi di regressione separati:

- la prima cerca di spiegare la variazione di spessore in funzione della velocità di avanzamento (raggio costante);
- la seconda cerca la funzione che lega la diminuzione di polvere depositata allontanandosi dal centro di mira della pistola verso i bordi del pannello

Per la prima campagna si sono prese le misure lungo la linea longitudinale centrale così da avere più repliche a raggio nullo. Si sono effettuate 4 repliche per ognuna delle 4 velocità.

I parametri scelti sono stati:

- polvere RAL 7016. Scelta semplicemente a caso fra quelle già utilizzate.
- velocità di avanzamento regolate su quattro livelli: 2,11 – 2,60 – 3,06 – 8,11 *m/min* corrispondenti ai valori sull'inverter di 13 – 16 – 19 – 50 *Hz*.
- percentuale-polvere al 70%. Un valore elevato a favore di un flusso denso ed omogeneo.

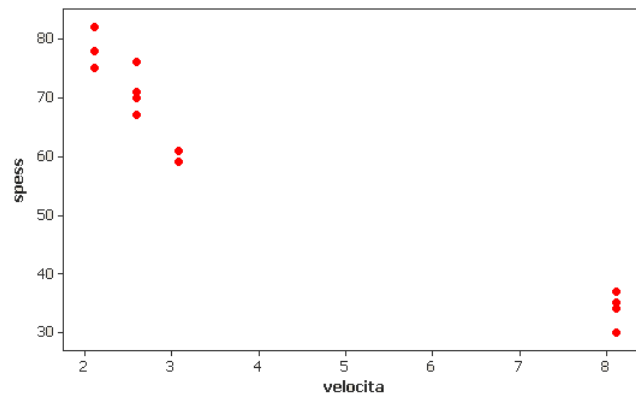
Dal grafico della dispersione dei dati in funzione della velocità (fig. 3.22) è già evidente un andamento decrescente.

Nell'analisi della regressione lineare si sono sottoposti a test t-Student, andamento lineare rispetto a v ed anche la sua inversa, $\frac{1}{v}$. Il modello che spiega meglio i dati ($R_{Sq} = 97,1\%$) è:

$$spessore(v) = 18 + \frac{132}{v} \quad (3.22)$$

con lo spessore in μm e la velocità in *m/min*. La risposta che si ricava è da intendersi il valore massimo di spessore, che si deposita nella zona centrale del flusso.

⁵È nostro interesse misurare il raggio d'azione solo sulla linea trasversale al piano (per il controllo degli spingoli) in quanto l'impianto lavora in continuo lungo la dimensione longitudinale.

Figura 3.22: Grafico *spessore* su *velocità*

Si riportano in tab. 3.7 i risultati della regressione.

	T-Student o F-Fisher	Pvalue
<i>costante</i>	T=88,44	0,000
$(perc. - polvere)^2$	T=21,76	0,000
<i>Regressione</i>	F=473,35	0,000
<i>Lack of fit</i>	F=1,68	0,227

Tabella 3.7: Risultati della regressione con il fattore velocità

Per vedere come, dal valore massimo centrale, lo spessore cali spostandosi verso gli esterni, si è sviluppata la successiva analisi di regressione che si viene ora a descrivere.

Sono state compiute tre misurazioni (repliche) per 9 raggi⁶ differenti alla velocità costante di $2,11m/min$.

Plottando i dati sperimentali sul grafico spessore-raggio (fig. 3.23) si è subito notata l'analogia con l'andamento ricavato dall'Università Fraunhofer di ingegneria dell'automazione di Stuttgart in Germania, ([8]) mostrato in fig. 3.24.

Nel caso dell'università tedesca il risultato è stato trovato usando una pistola corona, spruzzando in verticale e muovendosi contemporaneamente in orizzontale ad una velocità di circa $3m/min$.

La regressione dei dati, di cui in fig. 3.23, ha restituito l'equazione (3.23), ricavata ai minimi quadrati.

$$spessore(R) = -0,135 \cdot R^2 + cost. \quad (3.23)$$

Non abbiamo trascritto il valore della costante in quanto esso dipende dalla velocità di avanzamento. Possiamo infatti unire le due equazioni (3.22) e (3.23) ricavate con l'approccio un-fattore-alla-volta in quanto ovviamente a parametri non correlati fra loro.

⁶i raggi scelti sono: 0-5-6-10-11,5-15-17-20-23;

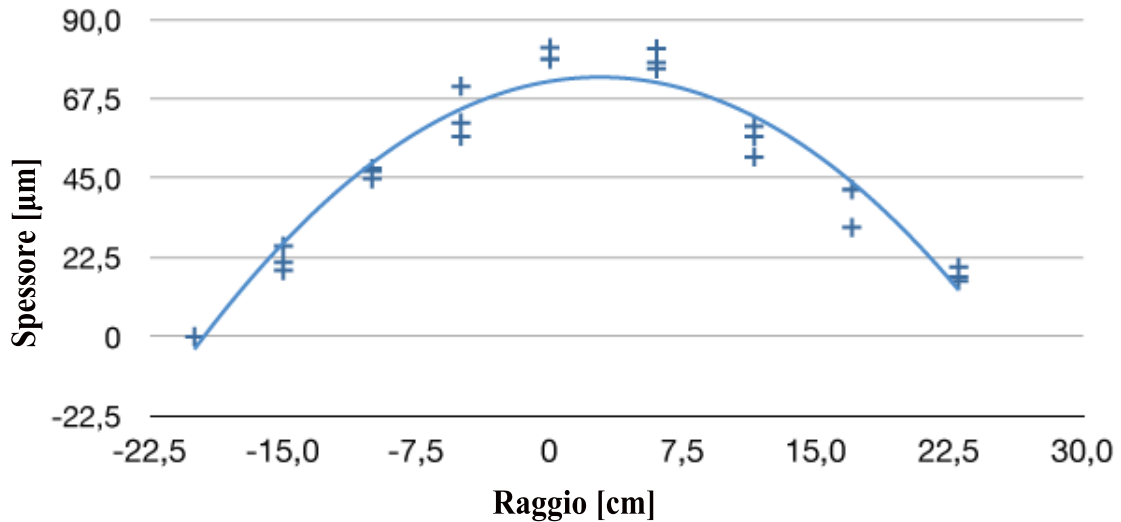


Figura 3.23: Dati sperimentali distribuzione polvere

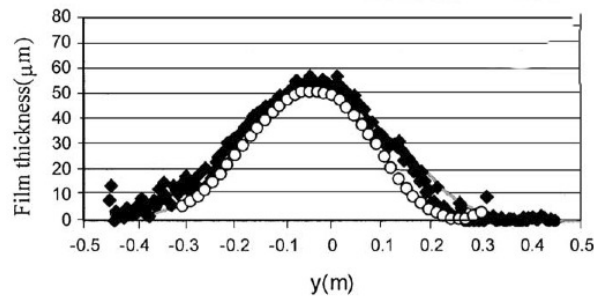


Figura 3.24: Distribuzione polvere ricavata dall'Università Fraunhofer

Il risultato è

$$spessore(R, v) = -0,135 \cdot R^2 + \frac{132}{v} \quad (3.24)$$

È importante tenere conto della presenza anche del moto trasversale della pistola ($27,36 \text{ m/min}$). Il termine v delle equazioni (3.22) e (3.24) è infatti la velocità relativa della pistola rispetto al pannello e sarà uguale a

$$V_{RELATIVA} = \sqrt{V_{pannello}^2 + V_{reciprocatore}^2} \quad (3.25)$$

L'equazione (3.24) inoltre non tiene conto della traiettoria a dente di sega (o sinusoidale a seconda dei tempi di accelerazione del reciprocatore) della pistola rispetto al pannello che causa il passaggio ripetuto sui punti già coperti. Questo fenomeno è strettamente legato al termine

$$V_{pannello} \cdot \frac{Corsa_{reciprocatore}}{V_{reciprocatore}} \quad (3.26)$$

ovvero il periodo della traiettoria a dente di sega. Nel caso particolare qui analizzato, la larghezza del pannello (e la conseguente corsa del reciprocatore) è piccola

e mantiene il prodotto (3.26) sempre basso e stabile intorno a $0,05 m$. Questo ci ha permesso di fissare a 4 il valore del rapporto fra lo spessore reale soggetto ai ripassaggi e quello dell'equazione (3.22).

Il risultato della (3.24) è da ritenersi utile, in sostanza, solo al fine del calcolo del raggio d'azione della polvere. Sui bordi, per esempio, punto di accumulo maggiore di spessore, si rivelerà un'ottima soluzione quella di fermare in anticipo la corsa del reciprocatore. Questo evita il passaggio ripetuto del getto con tutta la sua area utile, e solo la sua parte più esterna, meno densa, coprirà i bordi.

Nel caso particolare dell'esperienza qui descritta, si trovava un delta in più di polvere di circa $8 - 10 \mu m$ sulle parti laterali, al che è bastato fare l'inverso della funzione (3.23) per trovare una distanza consigliabile fra centro pistola e vordo, di circa $8 cm$.

3.6.4 Taratura per installazioni future

Le equazioni (3.21) e (3.24), viste nei precedenti paragrafi, risultano molto utili al fine della messa a punto ottimale ma è importante definirne i criteri di validità. Affinchè le grandezze siano omogenee e i parametri restituiti garantiscano un riferimento corretto e il meno possibile affetto da errori, è fondamentale la taratura del sistema.



Figura 3.25: Bilancia infinitesimale

Molti dei parametri che sono stati presentati infatti, indentificano una elasticità del sistema propria della fase pre-installazione dal cliente. Le regolazioni disponibili sull'impianto, in fase di produzione, devono e sono poche, rigidezza a favore di risultati migliori e più omogenei. la tab.3.8 riporta la suddivisione fra parametri per la taratura e quelli per l'elasticità di produzione.

La taratura a cui ci si riferisce può essere divisa in due ambiti:

- quello pneumatico dell'efficienza di aspirazione e trasporto della polvere;
- quello meccanico del posizionamento dei sensori per la corsa del reciprocatore.

Per il primo aspetto si interviene mediante l'impostazione dei parametri indicati al paragrafo 3.5.2. I coefficienti C_1 , C_0 , P_9 , e polvere-totale nascono infatti proprio a questo fine. Lunghezze dei tubi differenti, diametri, pieghe o strettoie eccessive generano perdite di carico che sarà necessario compensare.

Parametri per la taratura	Parametri per regolazioni in fase di produzione
C_1, C_0, P_9 , aria – totale, velocità longitudinale (fissata dalla capacità produttiva richiesta), corsa del reciprocatore (in caso di pannelli standard come nel caso del nostro cliente)	percentuale-polvere, corsa del reciprocatore (nel caso sia richiesta la verniciatura di pannelli di differenti dimensioni)

Tabella 3.8: Classificazione dei parametri

Lo scopo è ora quello di ottenere una precisa quantità di polvere in uscita sotto l'impostazione di precisi parametri. La procedura adottata è la seguente:

1. legare una busta sulla bocca della pistola in modo da raccogliere la polvere in uscita;
2. regolare i parametri per la taratura sui valori di primo tentativo, è consigliato prendere i valori standard (vedi fig. 3.12);
3. regolare, e non variarlo fino a fine taratura, il parametro percentuale-polvere su 50%; è un valore scelto semplicemente perchè nel prototipo ha fornito i valori di spessore più idonei e quindi consigliabile che sia il più possibile simile al nostro modello;
4. avviare per un minuto il sistema di spruzzo della pistola e dopo spegnere;
5. pesare la polvere raccolta nel sacchetto e verificare che corrisponda a circa 30 g;
6. qualora ci sia meno polvere o più, è utile usare le equazioni (3.15) e (3.16) per raggiungere direttamente il risultato prescritto.

A valle di questa taratura è possibile fare una verifica sui parametri elettrici dell'elettrodo verificando lo spessore che rimane sul pannello con uno spessimetro. Ciò nonostante, come spiegato al paragrafo 3.5.1, si consiglia di impostare un valore elevato di tensione, 90 kV, ed un'altezza di 20cm della pistola senza eccessive preoccupazioni in quanto si sta verniciando una superficie piana ed il sistema ACC provvederà alle piccole imperfezioni.

Per quanto riguarda il posizionamento dei sensori di prossimità che controllano l'ampiezza di lavoro del reciprocatore, è necessario fare una prova di applicazione della polvere la prima volta al fine di evidenziare il delta in più che bisogna eliminare. I sensori andranno posizionati ad una distanza dal bordo del pannello pari a

$$R = \frac{\Delta_{spessore}}{0,135} \quad (3.27)$$

Conclusioni

La costruzione di un prototipo rappresenta la fase più stimolante della creazione di nuove processi industriali e nuove idee. La sua flessibilità e la possibilità di entrare facilmente nei meccanismi più reconditi gioca tutta a favore dell'innovazione. Il prototipo per il processo di applicazione della polvere UV a cui si è lavorato è cresciuto passo dopo passo, grazie a continui test e misurazioni.

Il sistema sviluppato nasce propriamente per la vericiatura a polveri UV-indurenti di pannelli sandwich che richiede obiettivi più rigidi, rispetto alla polvere tradizionale, circa l'uniformità di distribuzione. Margini di miglioramento ci sono sempre ma i risultati ottenuti sono già soddisfacenti.

Le innumerevoli variabili che influenzano l'applicazione sono state ora ordinate e catalogate. Grazie agli studi statistici di analisi della varianza e regressione lineare semplice, è stato infatti possibile mettere in luce la diversa importanza dei parametri nonché la formula con cui intervengono nella modifica del risultato. Il margine di errore, di variabilità, rimane ma si riduce, permettendoci di cogliere soluzioni come quella di fermare in anticipo la corsa delle pistole per ridurre l'accumulo sui bordi, sempre in eccesso. Prima di tale idea, con un approccio meno rigoroso, si provava a risolvere interponendo barriere metalliche in prossimità del pannello, con la difficoltà del loro corretto posizionamento. Nessuno attualmente, nei sistemi di applicazione della polvere, adotta la nostra tecnica con attenzione verso l'omogeneità dello spessore.

Sono sempre ben accetti, inoltre, tutti i vantaggi che si possono trarre ogni volta che si sfida il cambiamento. Nello studio che si è qui descritto, l'ottimizzazione è anche stata una di questi.

La regolazione della giusta percentuale di polvere da erogare è raggiungibile con le equazioni di regressione ricavate e, unita all'attenta distribuzione, ha permesso infatti notevoli risparmi sull'over-spray. Si è misurata l'efficienza di trasferimento della polvere sul pannello, evidenziando come, prima del controllo dei parametri qui sviluppato, la polvere in over-spray era il 40% della totale erogata contro invece il nostro 15%. Considerando il costo della polvere UV (16 €/kg), il risparmio per ogni m^2 di superficie verniciata, escludendo il recupero, è di circa 30 centesimi di euro ogni metro quadrato.

Si fa più concreta la possibilità di eliminare tutto il circuito di recupero polvere.

Il vantaggio non è per un eccessivo costo o complicanza costruttiva ma, un risparmio notevole in termini di tempo dedicato al cambio colore. Il mercato diventa sempre più esigente con minori richieste di grossi numeri ma alla ricerca del particolare e della qualità. Le aziende sono costrette alla produzione di piccoli lotti per ogni colore e così diventa sempre più determinante la necessità di accelerare i tempi di setup.

In termini di consumi energetici, il sistema di applicazione della polvere sviluppato è sostanzialmente in linea con quello che offre il mercato. Le voci principali (vedi tab.3.9) rimangono i consumi dell'impianto di aspirazione e di aria compressa. C'è una prospettiva che si potrebbe aprire anche in questo senso però.

Utenza	Consumo
Pistola Corona	40 VA
Due motori elettrici	360 VA
Aspirazione	5 kW
Compressore	4,5 kW
PLC	19,2 VA

Tabella 3.9: Tabella consumi energetici

Qualora si decidesse di eliminare il sistema di recupero, buona parte del circuito di aspirazione verrebbe ridotto. È la causa di maggior assorbimento di energia e si presenterebbe così l'occasione per una sua riduzione.

Con questi risultati ci si pone ora la prospettiva di sviluppare sistemi d'applicazione anche per MDF e materiali plastici.

Forte innovazione potrà esserci grazie ad un rinnovamento dei sistemi di erogazione della polvere oltre che nella verniciatura di manufatti tridimensionali. Tutti aspetti che non ci ha riguardato in questa sede.

L'affiancare la diffusione del processo UV vuol essere solo il primo passo, riuscendo magari in futuro, a seguito di ulteriori miglioramenti e riadattamenti, a sostituire anche gli attuali sistemi di applicane per polvere tradizionale.

Appendice A

Dati ANOVA a 2 fattori

Sono qui riportati in sequenza tutti i dati ed i grafici degli studi di ANOVA descritti nel paragrafo 2.6.2.

Tabella A.1: Dati Anova

%polvere	kg/m3	spessore	RESI1	FITS1
40	527.1	62	-0.135	62.135
70	575.3	74	-8.235	82.235
70	575.3	74	-8.235	82.235
70	575.3	79	-3.235	82.235
70	575.3	87	4.765	82.235
70	575.3	79	-3.235	82.235
70	575.3	80	-2.235	82.235
70	575.3	85	2.765	82.235
70	575.3	87	4.765	82.235
70	575.3	79	-3.235	82.235
70	575.3	81	-1.235	82.235
60	575.3	60	-9.960	69.960
60	575.3	63	-6.960	69.960
60	575.3	71	1.040	69.960
60	575.3	73	3.040	69.960
60	575.3	76	6.040	69.960
60	575.3	73	3.040	69.960
60	575.3	79	9.040	69.960
60	575.3	74	4.040	69.960
60	575.3	74	4.040	69.960
60	575.3	73	3.040	69.960
50	575.3	55	-2.760	57.760
50	575.3	54	-3.760	57.760

%polvere	kg/m3	spessore	RESI1	FITS1
50	575.3	60	2.240	57.760
50	575.3	60	2.240	57.760
50	575.3	57	-0.760	57.760
50	575.3	59	1.240	57.760
50	575.3	62	4.240	57.760
50	575.3	57	-0.760	57.760
50	575.3	54	-3.760	57.760
50	575.3	54	-3.760	57.760
40	575.3	49	-1.235	50.235
40	575.3	46	-4.235	50.235
40	575.3	53	2.765	50.235
40	575.3	54	3.765	50.235
40	575.3	46	-4.235	50.235
40	575.3	48	-2.235	50.235
40	575.3	50	-0.235	50.235
40	575.3	53	2.765	50.235
40	575.3	50	-0.235	50.235
40	575.3	47	-3.235	50.235
30	575.3	42	2.590	39.410
30	575.3	40	0.590	39.410
30	575.3	36	-3.410	39.410
30	575.3	35	-4.410	39.410
30	575.3	38	-1.410	39.410
30	575.3	42	2.590	39.410
30	575.3	46	6.590	39.410
30	575.3	45	5.590	39.410
30	575.3	40	0.590	39.410
30	575.3	43	3.590	39.410
70	527.1	87	-7.135	94.135
70	527.1	88	-6.135	94.135
70	527.1	91	-3.135	94.135
70	527.1	94	-0.135	94.135
70	527.1	95	0.865	94.135
70	527.1	96	1.865	94.135
70	527.1	100	5.865	94.135
70	527.1	101	6.865	94.135
70	527.1	99	4.865	94.135
70	527.1	99	4.865	94.135

%polvere	kg/m3	spessore	RESI1	FITS1
60	527.1	77	-4.860	81.860
60	527.1	74	-7.860	81.860
60	527.1	76	-5.860	81.860
60	527.1	78	-3.860	81.860
60	527.1	81	-0.860	81.860
60	527.1	87	5.140	81.860
60	527.1	90	8.140	81.860
60	527.1	83	1.140	81.860
60	527.1	83	1.140	81.860
60	527.1	86	4.140	81.860
50	527.1	66	-3.660	69.660
50	527.1	66	-3.660	69.660
50	527.1	72	2.340	69.660
50	527.1	70	0.340	69.660
50	527.1	73	3.340	69.660
50	527.1	73	3.340	69.660
50	527.1	73	3.340	69.660
50	527.1	70	0.340	69.660
50	527.1	67	-2.660	69.660
50	527.1	72	2.340	69.660
40	527.1	56	-6.135	62.135
40	527.1	63	0.865	62.135
40	527.1	70	7.865	62.135
40	527.1	69	6.865	62.135
40	527.1	64	1.865	62.135
40	527.1	71	8.865	62.135
40	527.1	66	3.865	62.135
40	527.1	56	-6.135	62.135
40	527.1	62	-0.135	62.135
30	527.1	43	-8.310	51.310
30	527.1	48	-3.310	51.310
30	527.1	45	-6.310	51.310
30	527.1	55	3.690	51.310
30	527.1	51	-0.310	51.310
30	527.1	50	-1.310	51.310
30	527.1	51	-0.310	51.310
30	527.1	58	6.690	51.310
30	527.1	42	-9.310	51.310

%polvere	kg/m3	spessore	RESI1	FITS1
30	527.1	42	-9.310	51.310
70	503.0	97	0.205	96.795
70	503.0	89	-7.795	96.795
70	503.0	89	-7.795	96.795
70	503.0	95	-1.795	96.795
70	503.0	100	3.205	96.795
70	503.0	97	0.205	96.795
70	503.0	98	1.205	96.795
70	503.0	96	-0.795	96.795
70	503.0	96	-0.795	96.795
70	503.0	96	-0.795	96.795
60	503.0	82	-2.520	84.520
60	503.0	81	-3.520	84.520
60	503.0	80	-4.520	84.520
60	503.0	81	-3.520	84.520
60	503.0	80	-4.520	84.520
60	503.0	81	-3.520	84.520
60	503.0	85	0.480	84.520
60	503.0	91	6.480	84.520
60	503.0	87	2.480	84.520
60	503.0	82	-2.520	84.520
50	503.0	67	-5.320	72.320
50	503.0	63	-9.320	72.320
50	503.0	71	-1.320	72.320
50	503.0	75	2.680	72.320
50	503.0	79	6.680	72.320
50	503.0	80	7.680	72.320
50	503.0	77	4.680	72.320
50	503.0	72	-0.320	72.320
50	503.0	71	-1.320	72.320
50	503.0	68	-4.320	72.320
40	503.0	66	1.205	64.795
40	503.0	63	-1.795	64.795
40	503.0	66	1.205	64.795
40	503.0	65	0.205	64.795
40	503.0	73	8.205	64.795
40	503.0	69	4.205	64.795
40	503.0	68	3.205	64.795

%polvere	kg/m3	spessore	RESI1	FITS1
40	503.0	66	1.205	64.795
40	503.0	72	7.205	64.795
40	503.0	60	-4.795	64.795
30	503.0	49	-4.970	53.970
30	503.0	49	-4.970	53.970
30	503.0	55	1.030	53.970
30	503.0	53	-0.970	53.970
30	503.0	53	-0.970	53.970
30	503.0	54	0.030	53.970
30	503.0	70	16.030	53.970
30	503.0	53	-0.970	53.970
30	503.0	61	7.030	53.970
30	503.0	53	-0.970	53.970
70	641.6	88	-7.435	95.435
70	641.6	89	-6.435	95.435
70	641.6	96	0.565	95.435
70	641.6	94	-1.435	95.435
70	641.6	106	10.565	95.435
70	641.6	95	-0.435	95.435
70	641.6	105	9.565	95.435
70	641.6	105	9.565	95.435
70	641.6	96	0.565	95.435
70	641.6	104	8.565	95.435
60	641.6	80	-3.160	83.160
60	641.6	81	-2.160	83.160
60	641.6	84	0.840	83.160
60	641.6	93	9.840	83.160
60	641.6	85	1.840	83.160
60	641.6	81	-2.160	83.160
60	641.6	83	-0.160	83.160
60	641.6	88	4.840	83.160
60	641.6	83	-0.160	83.160
60	641.6	76	-7.160	83.160
50	641.6	60	-10.960	70.960
50	641.6	64	-6.960	70.960
50	641.6	70	-0.960	70.960
50	641.6	71	0.040	70.960
50	641.6	79	8.040	70.960

%polvere	kg/m3	spessore	RESI1	FITS1
50	641.6	74	3.040	70.960
50	641.6	79	8.040	70.960
50	641.6	72	1.040	70.960
50	641.6	73	2.040	70.960
50	641.6	68	-2.960	70.960
40	641.6	59	-4.435	63.435
40	641.6	58	-5.435	63.435
40	641.6	59	-4.435	63.435
40	641.6	61	-2.435	63.435
40	641.6	60	-3.435	63.435
40	641.6	63	-0.435	63.435
40	641.6	64	0.565	63.435
40	641.6	64	0.565	63.435
40	641.6	59	-4.435	63.435
40	641.6	56	-7.435	63.435
30	641.6	50	-2.610	52.610
30	641.6	53	0.390	52.610
30	641.6	54	1.390	52.610
30	641.6	56	3.390	52.610
30	641.6	56	3.390	52.610
30	641.6	49	-3.610	52.610
30	641.6	57	4.390	52.610
30	641.6	55	2.390	52.610
30	641.6	52	-0.610	52.610
30	641.6	49	-3.610	52.610

Appendice B

Anova a 2 fattori senza Canon

Si ripete lo studio ANOVA precedentemente fatto eliminando il colore CANON e mettendo in evidenza l'assenza di interferenza con lo spessore.

Si riporta qui di seguiti risultati dell'ANOVA (per i dati riferirsi alla tab. [A.1](#)).

Source	GDL	SS	MS	F	Pvalue
polvere	2	176,9	88,5	3,81	0,025
%polvere	4	34.390,5	8.597,6	370,32	0,000
Interaction	8	348,3	43,5	1,88	0,062
Error	135	3.134,3	23,5	1,88	0,069
Total	149	38.050,1			

Tabella B.1: Risultati Anova

Appendice C

Risultati regressione negativi a 30% di polvere

Risultati Regressione

Predictor	Coef.	SE coef.	T	Pvalue
Constant	19,823	1,548	12,81	0,000
%polvere	1,06633	0,02978	35,80	0,000

Test del Lack of fit con P-value del 1,4%, si accetta l'ipotesi nulla di modello non adeguato.

Bibliografia

- [1] Powder coatings technology- new developments at the turn of the century - T.A. Misev, R. van der Linde - DSM Resins bv, P.O. Box 615, 8000 AP Zwolle, The Netherlands - Received 15 July 1997; revised version received 14 April 1998; accepted 28 April 1998
- [2] The science and technology of electrostatic powder spraying, transport and coating
- [3] F. Sacchi, *Polym. Paint Colour J.* 186 (4376) (1996) 30.
- [4] J. Cross, A. Cetronio, *Trans. Inst. Metal Finishing* 55 (1977) 174-176.
- [5] Paolo M. Rinaldi, Verniciatura con Polveri UV di portoni sezionali, MDF e manufatti plastici. Dal mensile Verniciatura Industriale - Dicembre 2011
- [6] K. Yanagida, M. Kumata, M. Yamamoto, *J. Coat. Technol.* 68 (1996) 47—56.
- [7] Brevetto: Current limited elettrostatic spray gun system with positive feedback controlled constant voltage output - United States Patent - n. 4,508,276 - Date of Patent Apr. 2, 1985
- [8] Numerical simulation of the electrostatic powder coating process with a corona spray gun - Q. Ye*, T. Steigleder, A. Scheibe, J. Domnick, Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation, Nobelstr. 12, D-70569 Stuttgart, Germany
- [9] P.L. Smith, G.W. Penney, *AIEE Trans.* 80 (1961) 340.
- [10] A. Golovoy, *J. Paint Technol.* 45 (1973) 68—73.
- [11] Curing powders - How low can you go? - Carl Rijkse - from the magazine Powder Coating - April 2011