

# Controllo e gestione di un impianto di zincatura a caldo tramite l'analisi dimensionale

A. Astorre, B. Brevaglieri, M. Cecchini, L. Mandolesi, M. Memmi, S. Natali, P. Storace

*In un impianto di zincatura i parametri che controllano il processo di rivestimento sono numerosi e di difficile valutazione e ciò rende complesso il loro controllo e la loro gestione. Tramite l'analisi dimensionale è stata determinata una relazione che consente di valutare la qualità dei tubi zincati in un processo industriale in funzione dei parametri che controllano il processo stesso. Lo sviluppo dell'analisi dimensionale ha permesso di individuare due parametri adimensionali tramite i quali è stato possibile correlare lo spessore del rivestimento con i parametri di controllo dell'impianto.*

## INTRODUZIONE

I numerosi parametri che controllano la zincatura a caldo in discontinuo degli acciai condizionano la qualità ed il costo del prodotto finito.

Un'analisi degli effetti che ciascun parametro ha sulla qualità del rivestimento è di difficile esecuzione in quanto sono sconosciute le relazioni intercorrenti tra i vari parametri.

Lo scopo di questo lavoro è quello di determinare una relazione sperimentale, ricavata dall'elaborazione di una serie di dati relativi ad una campagna di zincatura di tubi eseguita dalla ZINCOL Lombarda, che correla lo spessore del rivestimento con tutti gli altri parametri operativi.

La natura del problema, la complessità dei parametri, la disponibilità dei dati ottenuti dall'impianto hanno suggerito il metodo dell'analisi dimensionale come la soluzione ottimale per correlare la qualità del prodotto finito con le grandezze operative.

## DESCRIZIONE DEL METODO

Il metodo si basa sul teorema di Buckingham. [1]

Una volta individuate le  $n$  grandezze che influiscono significativamente sul processo (grandezze di impianto) (Tab. 1) e le  $m$  grandezze fondamentali (Tab. 2), quelle cioè che sono presenti nelle dimensioni fisiche delle grandezze di impianto, il teorema di Buckingham consente di ridurre da  $n$  a  $n-m$  il numero dei parametri adimensionali necessari per la descrizione del processo.

Tuttavia, per ridurre ulteriormente il numero di tali parametri è opportuno accoppiare [2] le  $n$  grandezze d'impianto in modo da ridurre a due il numero dei parametri adimensionali. L'opportunità di eseguire tale accoppiamento nasce dall'esigenza di determinare due parametri adimensionali, uno in relazione con una grandezza d'impianto che controlla la qualità del prodotto ( $Q_{IQ}$ ) e l'altra ( $Q_{PRO}$ ) con le grandezze operative.

L'accoppiamento porta a ridurre da  $n$  a  $R$  il numero delle grandezze (derivate) che consentono di controllare l'impianto.

A. Astorre, B. Brevaglieri, M. Cecchini, M. Memmi, S. Natali, P. Storace,  
Dip. di Ingegneria Chimica, dei Materiali, delle Materie Prime e Metallurgia,  
Facoltà di Ingegneria, Università "La Sapienza", Roma

L. Mandolesi,  
Zincol Lombarda, Bellusco (MI)

Memoria presentata il 13 aprile 1999.

	Grandezza	Simbolo	U.M.
$n_1$	Temperatura	T	K
$n_2$	Tempo	t	s
$n_3$	Diametro est.	Fest.	m
$n_4$	Diametro int.	Fint.	m
$n_5$	Pressione	P	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>
$n_6$	Spessore del rivestimento	IQ	m
$n_7$	Reattività	R	m
$n_8$	Conducibilità termica dell'acciaio	l acc	kg m s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
$n_9$	Calore specifico dell'acciaio	Cp acc	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
$n_{10}$	Viscosità del bagno	m zn	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
$n_{11}$	Calore specifico del bagno	Cp zn	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
$n_{12}$	Densità del bagno	rZn	kg m <sup>-3</sup>

Tab. 1 - Grandezze d'impianto.

Table 1 - Galvanising plant quantities.

	Grandezze fondamentali	Unità fondamentali
$m_1$	Massa	Kg
$m_2$	Lunghezza	M
$m_3$	Tempo	S
$m_4$	Temperatura	K

Tab. 2 - Grandezze fondamentali.

Table 2 - Fundamental quantities.

	Grandezze derivate	Simbolo	U.M.
$R_1$	Indice di qualità	IQ	m
$R_2$	Temperatura	T	K
$R_3$	Pressione	P	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>
$R_4$	Parametro acciaio	Ac	kg m <sup>2</sup> s <sup>-5</sup> K <sup>-2</sup>
$R_5$	Parametro bagno	Bg	m <sup>-4</sup> s <sup>-3</sup>
$R_6$	Tempo	t	s

Tab. 3 - Grandezze derivate.

Table 3 - Derived quantity.

to. Per cui per avere  $n - R - m = 2$  parametri adimensionali, sono necessarie 6 grandezze derivate ( $R_1, R_2, R_3, \dots, R_6$ ) (Tab. 3).

La trattazione analitica del problema, come descritto in [3], porta a stabilire una relazione tra  $Q_{IQ}$  e  $Q_{PRO}$  del tipo:

$$\log Q_{IQ} = b + a \log Q_{PRO} \quad (1)$$

dove  $Q_{IQ} = f(R_1, R_2, \dots, R_5)$  e  $Q_{PRO} = f(R_2, R_3, \dots, R_6)$ .  
Dalla relazione (1) si ricava un'espressione del tipo

$$R_1 = f(R_2, R_3, \dots, R_6)$$

che è in grado di determinare il valore di controllo  $R_1$  rispetto alle rimanenti grandezze derivate  $R_2, R_3, \dots, R_6$ .

**APPLICAZIONE DEL METODO**

**Grandezze d'impianto**

Le grandezze di impianto scelte per controllare l'intero processo sono elencate in Tab. 1.

Tra queste alcune meritano un chiarimento.

• *La reattività (R)*

Dalla letteratura [4] e dall'evidenza sperimentale è noto che la composizione chimica dell'acciaio da rivestire condiziona la qualità e il tipo di rivestimento ottenuto. E' opportuno, quindi, considerare tra le grandezze di impianto almeno il contenuto di quegli elementi che maggiormente condizionano il rivestimento come il Si e il P tramite la relazione [5]:

$$[Si_{eq}] = [Si] + 2.5[P].$$

Nell'ambito della sperimentazione sono stati utilizzati acciai le cui composizioni sono elencate in Tab. 4.

Dalla curva di Sandelin relativa alla zincatura di acciai per tempi e temperature confrontabili con quella di esercizio è stata ricostruita per punti la funzione che correla la R con il tenore di  $Si_{eq}$  (Fig. 1).

• *Indice di qualità (IQ)*

Un buon rivestimento deve essere caratterizzato sotto più aspetti che vanno da un adeguato spessore ad una superficie rivestita sufficientemente uniforme e liscia tenendo anche conto, per esempio, dell'estensione e della morfologia dell'interfaccia. A questo proposito si sarebbe potuto introdurre un parametro che tenesse conto di tutti questi aspetti, ma si è preferito non considerarli in quanto alcuni sono affetti da valutazioni troppo soggettive, mentre altri presentano difficoltà intrinseche di misurazione o tempi di rilevazione troppo lunghi per poter essere applicati nel ciclo di zincatura. Pertanto per avere una valutazione rapida è stato posto l'indice di qualità uguale allo spessore del rivestimento: ( $IQ = \text{spessore}$ ).

Lo spessore del rivestimento è stato valutato, sull'impianto, come media di dieci misure effettuate con un misuratore magnetico. L'attendibilità di tale valore è stata verificata in laboratorio con due metodi: misurazione tramite osservazio-

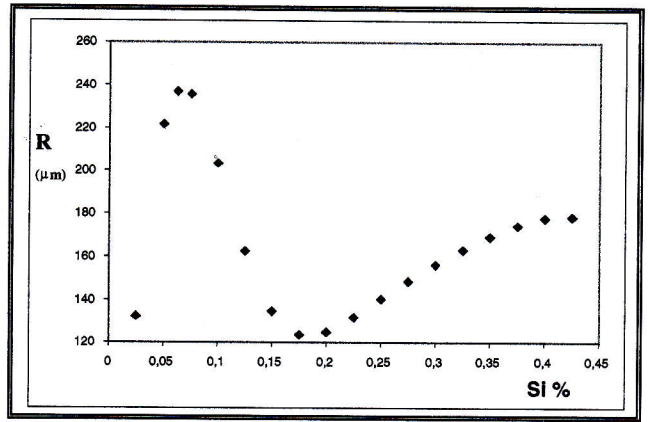


Fig. 1 - Andamento della reattività in funzione del tenore di silicio.

Fig. 1 - Reactivity vs. Si content.

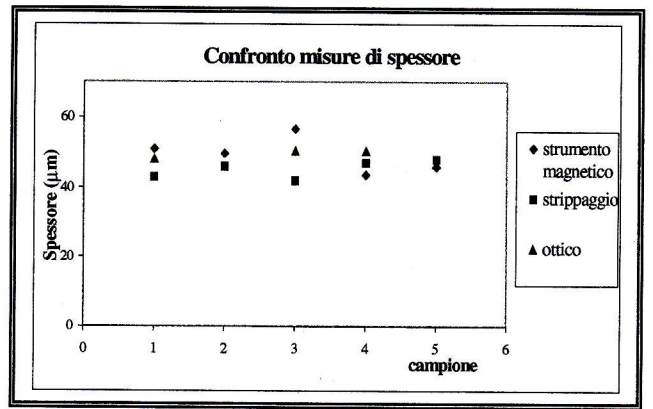


Fig. 2 - Confronto delle misure di spessore.

Fig. 2 - Coating thickness comparison.

ne metallografica e valutazione della perdita in peso in seguito ad attacco con acido inibito (Fig. 2).

**Grandezze fondamentali**

Per descrivere il processo sono state scelte le unità di misura espresse in Tab. 2.

**Accorpamento delle grandezze fisiche: grandezze derivate**

Come precedentemente accennato, per ottenere due parametri adimensionali occorre ridurre le 12 grandezze d'impianto (Tab. 1) a 6 grandezze derivate.

Le grandezze derivate che concorrono a controllare il processo sono elencate in Tab. 3.

La temperatura del bagno, il tempo d'immersione, la pressione della soffiante e l'indice di qualità sono grandezze derivate prese direttamente da quelle d'impianto, mentre le grandezze Ac (acciaio) e Bg (bagno) sono derivate da quelle d'impianto.

Acciai	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cu	Cr	Si <sub>eq.</sub>
A	0.11	0.01	0.45	0.013	0.006	0.011	0.027	0.048	0.013	0.0425
B	0.19	0.196	1.48	0.039	0.003	0.019	0.078	0.181	0.036	0.2947
C	0.18	0.191	1.51	0.072	0.002	0.027	0.082	0.188	0.042	0.3727
D	0.04	0.000	0.79	0.172	0.007	0.014	0.019	0.026	0.016	0.4312
E	0.028	0.000	0.71	0.006	0.012	0.016	0.025	0.071	0.016	0.01
F	0.005	0.063	0.66	0.004	0.005	0.024	0.116	0.137	0.42	0.0745

Tab. 4 - Composizione chimica degli acciai usati.

Table 4 - Chemical composition of steels.

**Grandezza Ac (R<sub>4</sub>)**

Congloba le seguenti grandezze d'impianto: Φ<sub>int.</sub>, Φ<sub>est.</sub>, IQ, R, λ<sub>acc.</sub>, Cp<sub>acc.</sub> secondo la seguente relazione da noi ipotizzata:

$$Ac = \frac{\text{Superficie}}{\text{Volume}} \cdot \frac{IQ}{R} \cdot \lambda_{acc} \cdot Cp_{acc} = \frac{4(\phi_e - \phi_i)}{(\phi_e^2 - \phi_i^2)} \cdot \frac{IQ}{R} \cdot \lambda_{acc} \cdot Cp_{acc} \quad (2)$$

**Grandezza Bg (R<sub>5</sub>)**

Congloba le seguenti grandezze d'impianto: Cp<sub>Zn.</sub>, T, μ<sub>Zn.</sub>, ρ<sub>Zn</sub> legate secondo la seguente relazione ipotizzata:

$$Bg = Cp_{Zn} (T - 298.15) \frac{\mu_{Zn}}{\rho_{Zn}} \quad (3)$$

**Definizione dei parametri adimensionali**

Le uniche condizioni che devono essere rispettate per l'applicazione del metodo sono, secondo il teorema di Buckingham, le seguenti [1]:

- i parametri adimensionali (Q<sub>iq</sub> e Q<sub>pro</sub>) devono essere indipendenti;
- ogni grandezza derivata deve comparire almeno in uno dei parametri adimensionali.

Di conseguenza possono essere definiti i seguenti parametri:

$$Q_{iq} = IQ^a T^b P^c Ac^d Bg^e$$

$$Q_{pro} = t^l T^m P^n Ac^p Bg^q$$

**Valutazione di Q<sub>IQ</sub> e Q<sub>PRO</sub>**

Imponendo l'adimensionalità ai due parametri, attraverso il metodo degli indici [3], si ottiene:

$$Q_{IQ} = IQ^1 T^2 P^{-1} Ac^1 Bg^{-1} \quad (4)$$

$$Q_{pro} = t^1 T^{8/3} P^{-4/3} Ac^{4/3} Bg^{-1} \quad (5)$$

I valori di Q<sub>IQ</sub> e Q<sub>PRO</sub> sono stati ricavati misurando le 12 grandezze di impianto per 80 tubi zincati sotto diverse condizioni operative. Da queste grandezze sono state ricavate per ogni tubo le 6 grandezze derivate e con queste sono stati determinati i rispettivi valori di Q<sub>IQ</sub> e Q<sub>PRO</sub>. I valori minimi, massimi e medi delle 6 grandezze sono riportati in Tab. 5.

Le 80 coppie di valori Q<sub>IQ</sub> e Q<sub>PRO</sub> sono riportate nel grafico di Fig. 3. Su questo si può osservare una buona correlazione lineare tra log Q<sub>IQ</sub> e log Q<sub>PRO</sub>. La retta interpolatrice ha la seguente espressione:

$$\log Q_{IQ} = 0.6914 \log Q_{PRO} - 4.0405 \quad (6)$$

che nella forma esponenziale, a cui è stata sostituita la (4) e la (5), diventa:

$$IQ = 10^{-4.0405} * t^{0.6914} * T^{-0.1562} * P^{0.0781} * Ac^{-0.0781} * Bg^{0.3086} \quad (7)$$

**VERIFICA DELLE IPOTESI ED ATTENDIBILITÀ DEI RISULTATI**

La relazione (7) correla lo spessore (IQ) con le altre 5 grandezze derivate. La relazione è teorica ed è strettamente condizionata dalla scelta delle grandezze derivate.

Tab. 5 - Valori minimi, massimi e medi delle grandezze derivate.

Table 5 - Minimum, maximum and average values of derived quantities.

Valori	IQ	t	T	P	Ac	Bg
min	0.00003	36	713.15	250000	1.497288	1.3E-05
max	0.00014	330	729.15	415000	23.88061	1.35E-05
media	5.82E-5	102.15	721.275	330250	4.941719	1.328E-5

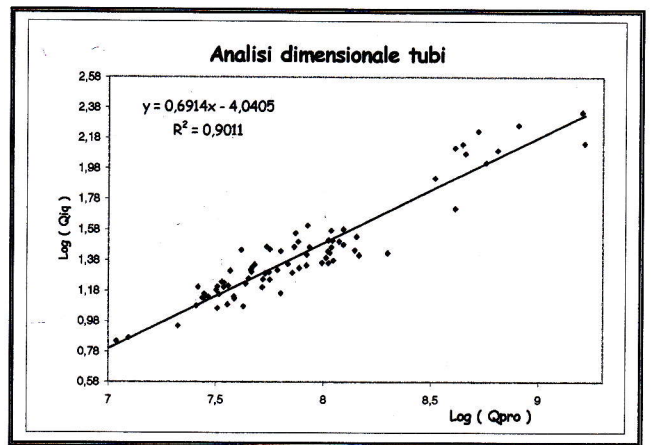


Fig. 3 - Correlazione dei parametri adimensionali e andamento teorico del processo di zincatura.

Fig. 3 - Relationship between dimensional parameter and theoretical trend of the galvanising process.

Per verificare l'attendibilità della relazione sono stati valutati i singoli effetti che ciascuna delle 5 grandezze ha sull'andamento dello spessore. Ciascuna grandezza è stata fatta variare tra il rispettivo valore minimo e massimo mantenendo costante, pari ai rispettivi valori medi, le rimanenti (Tab. 5). I risultati sono rappresentati nelle Figg. 4-8.

- IQ in funzione del tempo t (Fig. 4). Si conferma l'andamento parabolico dello spessore rispetto al tempo di immersione [6].
- IQ in funzione della temperatura T (Fig. 5). Si conferma la linearità della crescita dello spessore rispetto alla temperatura per il tempo medio indagato [6].
- IQ in funzione della pressione P (Fig. 6). Considerando l'ampio intervallo di pressione indagato e la limitata variazione dello spessore si osserva che la pressione non gioca un ruolo importante dal punto di vista del processo di zincatura. Ciò può essere spiegato dall'elevata velocità di solidificazione dello Zn, per cui lo spessore, che solidifica in tempi brevissimi, non subisce variazione con la pressione. D'altra parte la soffiante è fondamentale per eliminare l'eccesso di Zn liquido al momento dell'estrazione e la variabilità della pressione è dovuta solo alla variazione del diametro del tubo: infatti, per mantenere la portata d'aria costante sul tubo la pressione della soffiante deve aumentare all'aumentare del diametro del tubo stesso.
- IQ in funzione del parametro acciaio Ac. Dalla (2) si nota che questo varia solo con Φ<sub>int.</sub>, Φ<sub>est.</sub> e R in quanto Cp e λ sono costanti nel range di temperatura indagato [7]. • *Variazione di IQ rispetto ad R (Fig. 7)*. Dal grafico si conferma l'influenza del tenore di silicio sullo spessore del rivestimento. *Variazione di IQ rispetto ai diametri Φ<sub>int.</sub>, Φ<sub>est.</sub> (Fig. 8)*. All'aumentare del Φ<sub>est.</sub> o al diminuire del Φ<sub>int.</sub> si ha un aumento della massa del tubo, quindi aumenta la quantità di calore che il tubo deve cedere all'ambiente durante il raffreddamento. Ne consegue che il tubo si raffredda più lentamente, quindi la crescita delle fasi interfacciali

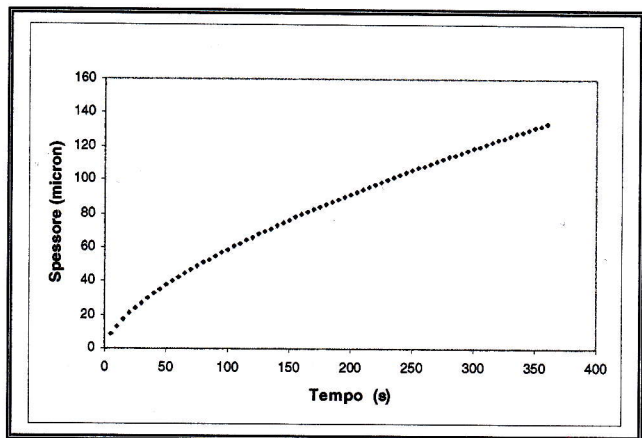


Fig. 4 - Andamento dello spessore in funzione del tempo di immersione.

Fig. 4 - Coating thickness vs. immersion time.

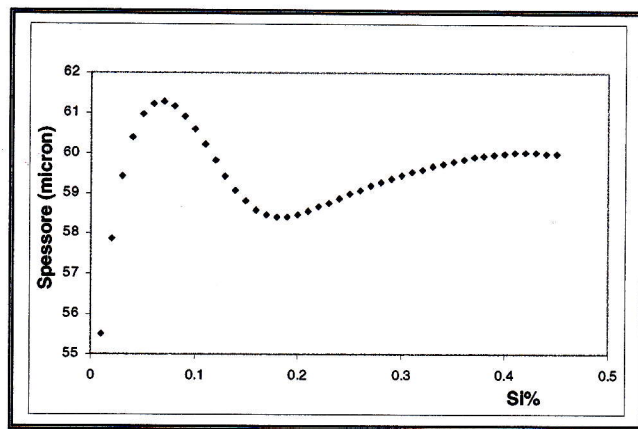


Fig. 7 - Andamento dello spessore in funzione del tenore di silicio.

Fig. 7 - Coating thickness vs. Si content.

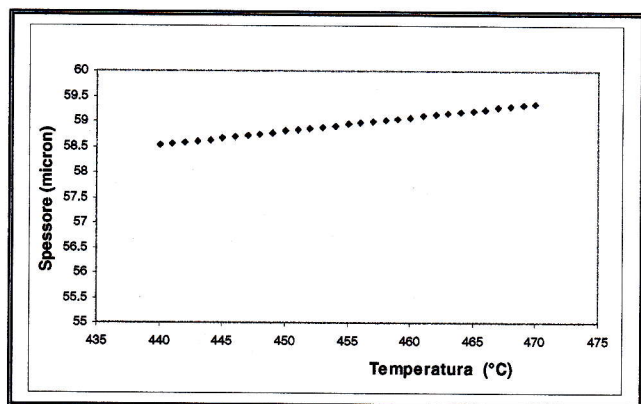


Fig. 5 - Andamento dello spessore in funzione della temperatura del bagno.

Fig. 5 - Coating thickness vs. bath temperature.

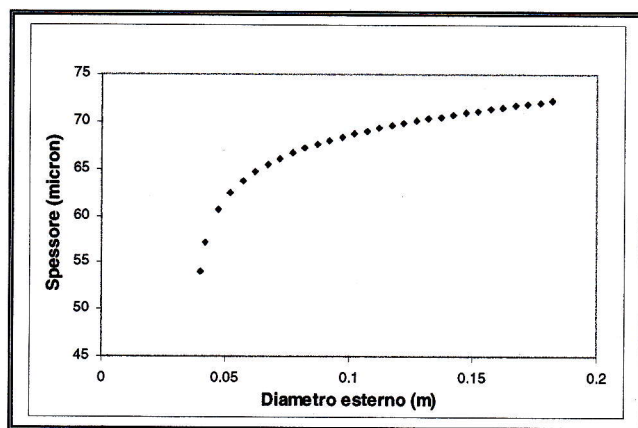


Fig. 8 - Andamento dello spessore in funzione del diametro esterno.

Fig. 8 - Coating thickness vs. external diameter.

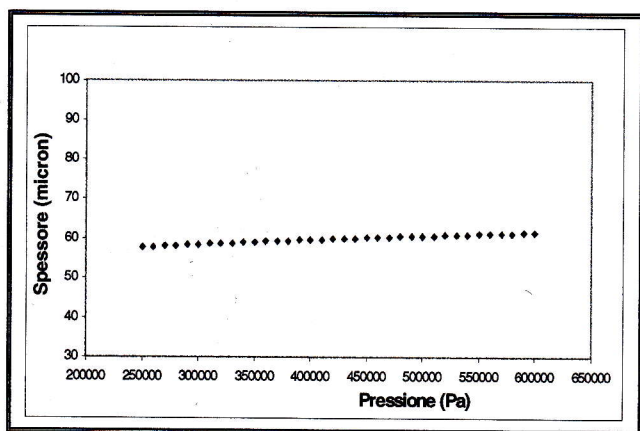


Fig. 6 - Andamento dello spessore in funzione della pressione.

Fig. 6 - Coating thickness vs. pressure.

è relativamente maggiore e di conseguenza è anche maggiore lo spessore totale del rivestimento.

- IQ in funzione del parametro bagno Bg. Dalla definizione del parametro Bg (3), si osserva che questo è funzione, oltre che della temperatura, anche del calore specifico e della viscosità cinematica del bagno. Tuttavia nell'intervallo di temperatura di funzionamento dell'impianto sia  $Cp_{Zn}$  che la  $\nu_{Zn}$  [7] si possono ritenere costanti e di conseguenza la dipendenza di IQ da Bg si può ritenere identica a quella relativa alla temperatura.

### INTERPRETAZIONE STATISTICA DEI RISULTATI

Dalle misure eseguite sull'impianto sono noti gli spessori effettivi degli 80 tubi controllati ( $S_{eff.}$ ), determinate mediante misuratore magnetico. La relazione (7) consente di determinare lo spessore teorico ( $S_{teor} = IQ$ ) atteso in varie condizioni di rivestimento.

Per un'ulteriore verifica della (7) sono stati calcolati gli  $S_{teor}$  nelle stesse condizioni di zincatura degli 80 tubi e si è calcolato l'errore relativo per ogni tubo secondo la seguente relazione:

$$[(S_{eff.} - S_{teor}) / S_{eff.}] * 100$$

Gli errori ottenuti sono stati suddivisi in 7 classi e sono stati contati i campioni che cadevano all'interno di ognuna di esse (Tab. 6).

Il relativo istogramma (Fig.9) evidenzia un andamento simile ad una distribuzione gaussiana.

In Fig. 10 e nella Tab.7 sono messi a confronto i valori osservati e teorici, ipotizzando per questi ultimi la distribuzione di Gauss.

E' stato intuitivo verificare la distribuzione osservata degli errori con il test del  $\chi^2$  ipotizzando per esso la distribuzione normale (Fig.11) [8, 9].

Il test eseguito con 6 gradi di libertà ha mostrato un'attendibilità del 75% dimostrando la natura casuale e non sistematica degli errori [10].

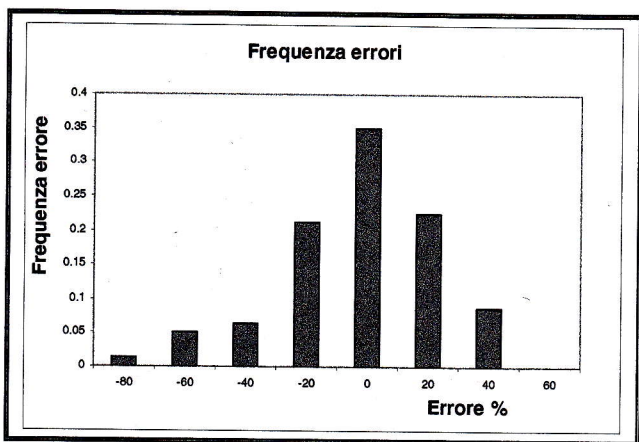


Fig. 9 - Distribuzione degli errori osservati.

Fig. 9 - Observed errors distribution.

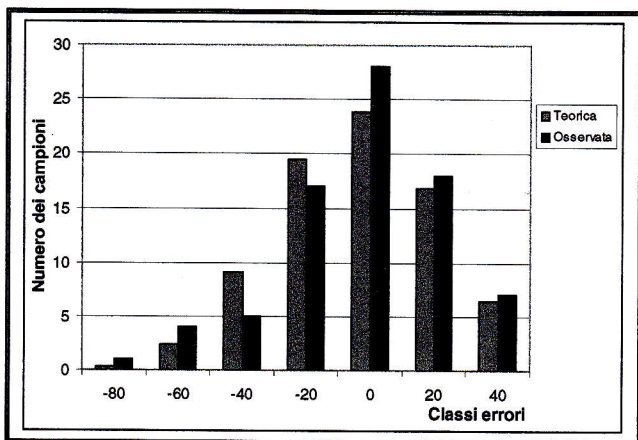


Fig. 10 - Confronto delle distribuzioni degli errori osservati e teorici (Gauss).

Fig. 10 - Observed vs. theoretical errors distribution (Gauss).

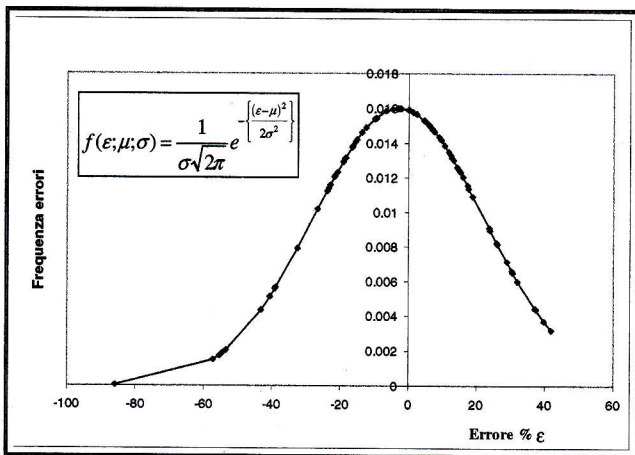


Fig. 11 - Distribuzione gaussiana degli errori con  $m = -2.84$ ;  $s = 24.92$ .

Fig. 11 - Gauss errors distribution with  $m = -2.84$ ;  $s = 24.92$

**DISCUSSIONI E CONCLUSIONI**

La relazione (7) consente di determinare con una buona attendibilità lo spessore del rivestimento in funzione dei vari parametri d'impianto. Questa relazione può essere usata in due modi: note le condizioni di funzionamento di impianto si può facilmente determinare lo spessore del rivestimento; note le caratteristiche dell'acciaio da rivestire (parametro acciaio) e stabilito uno spessore per il rivestimento (IQ) si possono determinare le condizioni d'impianto (P, t, T, Bg) neces-

Classe		Numero campioni
-90	-70	1
-70	-50	4
-50	-30	5
-30	-10	17
-10	+10	28
+10	+30	18
+30	+50	7

Tab. 6 - Classi di errori e relativi numero di campioni.

Table 6 - Errors classification and relevant specimens number.

		Frequenze osservate	Frequenze teoriche
$-\sigma$	$+\sigma$	75%	68.27%
$-2\sigma$	$+2\sigma$	93.75%	95.45%
$-3\sigma$	$+3\sigma$	98.75%	99.73%

Tab. 7 - Confronto frequenze osservate e teoriche.

Table 7 - Comparison between observed and theoretical frequencies.

sarie per ottenerlo. Il metodo dell'analisi dimensionale, oltre a controllare e gestire la qualità del prodotto, consente di affrontare e risolvere i problemi di scaling-up e scaling-down [11]. In tal modo sarà possibile trasferire in laboratorio i problemi che si manifestano sull'impianto, nonché trasferire le condizioni sperimentate in laboratorio sull'impianto. La formula non tiene conto della composizione e della struttura del rivestimento; è ipotizzabile per il futuro un IQ funzione non solo dello spessore totale del rivestimento ma anche dell'estensione e della morfologia delle fasi intermetalliche.

**RINGRAZIAMENTI**

Si desidera ringraziare gli Ingegneri Fabrizio Scolamacchia per il suo contributo alla discussione in sede d'impostazione del lavoro e Luca Matteucci per l'abile ed accurata rilevazione dei dati sperimentali sull'impianto Zincol Lombarda e per il suo contributo fornito nell'interpretazione statistica dei risultati.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] P. H. Bridgamm: "Dimensional analysis"(Yale University Press,1931).
- [2] J. R. Schnittger, "Dimensional Analysis in Design, Journal of Vibration, Acoustic, Stress and Reliability in Design, Vol 11, 1988, pp 401-407
- [3] I. Balducci: "Trasmissione del calore", E.S.A. Editrice 1981.
- [4] R. W. Sandel: "Galvanizing characteristics of different types of steels", Wire and Wire Products, n°1 (1940) 655-676, n°18 (1940) 721-741, n°1 (1941) 28-35.
- [5] J. Pelerin, J. Koffmann, V. Leroy: "The influence of silicon and phosphorus on the commercial galvanization of mild steels", Metal.,35,9 (1983), 870-873.
- [6] M. Guttmann: "Diffusive phase trasformations in hot-dip galvanizing", Materials Science Forum vol.155-156 (1994),527-548.
- [7] B. D. Notowidjojo, N.F. Kénonn, and A.L Wingrove: "Zinc-0.1% Nickel Coating of Silicon Containing Steel", Material Science and Technology, 6 (1990), pp. 681-686.

[8] P. Gennaro: "Introduzione alla statistica", ETAS Libri, 1975.  
 [9] R. Spiegel: "Statistica" ETAS Libri 1976.  
 [10] F. P. Branca, "Misure meccaniche", Masson Editoriale

ESA, 1994.

[11] M. Zlokarnik: "Problems in the application of dimensional analysis and scale-up of mixing operations", Grillpanzer Strabe 58, A-8010 Granz, Austria.

— A B S T R A C T —

*This work aims at finding an experimental equation, based on experimental data taken of a tubes galvanising campaign made at Zincol Lombarda plant, which correlate the Zinc coating thickness with the operational parameters of the plant. The method is based on the theorem of Buckingham [1] which allows to reduce the number of the non-dimensional parameters necessary to describe a process. This reduction is necessary here in order to be able to fix 2 non-dimensional parameters, the first containing a plant quantity controlling the product quality ( $Q_{IQ}$ ) and the second ( $Q_{PRO}$ ) containing process quantities.*

*The analytical solution of the problem, as it is described in [3], leads to establish a relationship between  $Q_{IQ}$  and  $Q_{PRO}$ . Among the plant quantities, chosen to control the entire process, some needs to be commented.*

*Reactivity (R) described by the Sandelin curve, which is influenced by the chemical composition of the steel to be coated:  $Si_{eq} = Si + 2.5 * P$ , has been analytical recalculated by means of an interpolating polynomial.*

*In order to have a quick plant assessment, the so-called quality index (IQ), has been assumed to be equal to the coating thickness, measured by means of a magnetic device. The dependability of this measure was assessed by an independent method.*

*For the process description few quantities defined fundamentals (Table 2) or derived (Table 3), were chosen and put together in order to obtain 2 non-dimensional parameters.*

*The bath temperature, the immersion time, the pressure at the air-blow ring and the so-called quality index were taken directly from the plant, while other quantities such as Ac (steel) and Bg (molten bath) are derived from those of the plant.*

*The values of  $Q_{IQ}$  and  $Q_{PRO}$  have been calculated measuring 12 plant quantities for 80 tubes galvanized in several conditions.*

*The interpolation line (7) is expressed in an exponential form.*

*From the results*

- *The parabolic trend of coating thickness with immersion time is confirmed (Fig.4). [6].*
- *The linear increase of thickness with bath temperature for the average immersion time, is confirmed (Fig.5) [6].*
- *Considering the large pressure variation tested and the little coating thickness variation, pressure does not play an important role in this galvanising process (Fig.6).*
- *From equation (2) we may note that IQ (quality index) as a function of Ac, varies only with  $\Phi_{int}$ ,  $\Phi_{est}$ , and R as Cp and  $\lambda$  are constant within the tested temperature range [7].*
- *From the definition of Bg (3) we may note that this is a function, besides temperature, also of the specific heat and cinematic viscosity of the bath.*

*In order to assess the dependability of the method described above, a  $\chi^2$  test was run making the hypothesis of a normal distribution (Fig.11) [8, 9].*

*This relationship can be used in two ways: once the production conditions are known, the coating thickness can be calculated or if the steel characteristics are known (steel parameter) and the wanted coating thickness are set-up then the necessary plant parameters (P, t, T, Bg) may be calculated.*

*Dimensional analysis besides quality control and programming, allows also to solve scaling-up and scaling-down problems [11], as in this way it is possible to transfer at a lab scale, production problems and vice versa.*

*The mathematical model does not actually take into account the coating composition and morphology, but this will be included in IQ in the future especially for the morphology of the fragile interface growth.*