

ML  
27/9/01

#5559



CONDIZIONAMENTO DELL'ARIA  
RISCALDAMENTO  
REFRIGERAZIONE

# Problematiche di misura e controllo dell'umidità dell'aria

D. Cerra, M. Dell'Isola, P. Vigo

## 0. INTRODUZIONE

L'igrometria è uno dei settori della metrologia fisico-tecnica in cui si sono verificati in questi ultimi anni i maggiori sviluppi, sia dal punto di vista della realizzazione di sensori di nuova concezione, che da quello del miglioramento delle prestazioni degli strumenti tradizionali. Tali sviluppi, imputabili essenzialmente ai sempre più stringenti vincoli tecnologici ed energetici degli impianti civili ed industriali, sono stati favoriti dal miglioramento delle tecnologie costruttive dei sensori (quali quelle a film spesso o sottile, quelle basate sulle tecnologie elettro-ottiche ecc.) e dalla incontenibile diffusione negli impianti dei sistemi di controllo.

Nella misura della grandezza umidità negli ultimi 25 anni si è infatti passati da una fase primordiale, caratterizzata da pochi ed inaffidabili strumenti, ad una più specialistica caratterizzata dalla disponibilità di un elevato numero di sensori, diversificati sia in termini di principi di misura, che di tecnologie costruttive. A tale situazione di mercato corrisponde inoltre la disponibilità di campioni primari accettati internazionalmente, seppure non ancora perfettamente riproducibili come campioni di trasferimento. Condizione quest'ultima indispensabile alla definizione metrologica di qualsiasi grandezza fisica.

Il termine *misura dell'umidità* è però molto generico, non solo in relazione all'ambiente di misura (gas, liquido, solido), ma anche per quanto riguarda il para-

metro fisico di misura (grado, igrometrico, titolo, umidità relativa ecc.) cui si fa riferimento. Infatti, se dal punto di vista etimologico con la dizione *misura dell'umidità* si intende sempre la determinazione del contenuto di acqua nell'ambiente di misura, dal punto di vista metrologico ci si trova di fronte a differenti parametri fisici - e relativi metodi di misura - che permettono tale determinazione.

In particolare, limitando il campo di osservazione al caso più diffuso di misura dell'umidità dell'aria, questa può essere espressa e misurata tramite differenti parametri termoigrometrici tra loro correlati. La numerosità e diversificazione di tali parametri nascono, oltre che dalla giusta esigenza di quantificare la grandezza termoigrometrica caratterizzante la particolare applicazione, dall'uso consolidato di metodologie di misura che influiscono sull'espressione del misurando stesso. A ciò si aggiunge inoltre la possibilità di determinare il parametro di interesse dalla misura di più grandezze (misura indiretta) ad esso correlate, tecnica quest'ultima che, pur essendo in teoria sempre possibile e spesso disponibile "a menù" in molti termoigrometri a microprocessore, può presentare un limitato significato metrologico a causa della inevitabile propagazione delle incertezze di misura.

Tutto ciò può determinare nell'utente confusione sia nella scelta del sensore di misura più idoneo alla specifica applicazione, che nella valutazione comparata delle prestazioni metrologiche dei differenti strumenti di misura.

## SIMBOLOGIA

$\varphi$	grado igrometrico
$\mu$	grado di saturazione
$\pi_\varphi$	coefficiente di peso relativo al grado igrometrico
$\pi_p$	coefficiente di peso relativo alla pressione
$\pi_T$	coefficiente di peso relativo alla temperatura
$\pi_{x_i}$	coefficiente di peso relativo alla variabile casuale $x_i$
$\rho_v$	densità del vapor d'acqua contenuto in un campione di aria umida alla temperatura $T_a$ e pressione $p$
$\rho_{vs}$	densità del vapor d'acqua contenuto in un campione nelle condizioni di saturazione
$\sigma_{x_i}$	deviazione standard sulla variabile casuale $x_i$
$\sigma_y$	deviazione standard sulla variabile casuale $y$
$\varepsilon_{x_i}$	deviazione standard relativa sulla variabile casuale $x_i$
$\varepsilon_y$	deviazione standard relativa sulla variabile casuale $y$
$C_{pa}$	calore specifico medio a pressione costante dell'aria secca

$C_{pv}$	calore specifico medio a pressione costante del vapore d'acqua
$C_{pw}$	calore specifico medio dell'acqua
$h_{gr\ell}$	entalpia di riferimento
$M_a$	peso molecolare dell'aria secca convenzionali
$M_v$	peso molecolare dell'acqua
$p$	pressione totale dell'aria umida
$p_a$	pressione parziale dell'aria secca
$p_v$	pressione parziale del vapor d'acqua presente nel campione di aria umida
$p_{vs}$	pressione parziale del vapor d'acqua nelle condizioni di saturazione (tensione di vapore)
$T$	temperatura in gradi kelvin
$t$	temperatura in gradi celsius
$T_{ba}$	temperatura di bulbo asciutto
$T_{bu}$	temperatura di bulbo umido termodinamica
$T_r$	temperatura di rugiada
U.A.	umidità assoluta
U.R.	umidità relativa
U.S.	umidità specifica
$x$	titolo dell'aria umida
$x_s$	titolo dell'aria umida in condizioni di saturazione
$z$	variabile gaussiana standardizzata

In questa memoria, a valle di una breve disamina dei più diffusi metodi di misura dell'umidità dell'aria (in termini di prestazioni e limiti) e alla luce di una loro classificazione, vengono evidenziati gli effetti che la propagazione delle incertezze di misura comporta nel calcolo di un parametro termoigrometrico a partire dalla misura di altri ad esso correlati. Intendendo in tal modo fornire un utile strumento per una univoca scelta del sensore di umidità più idoneo alle differenti esigenze.

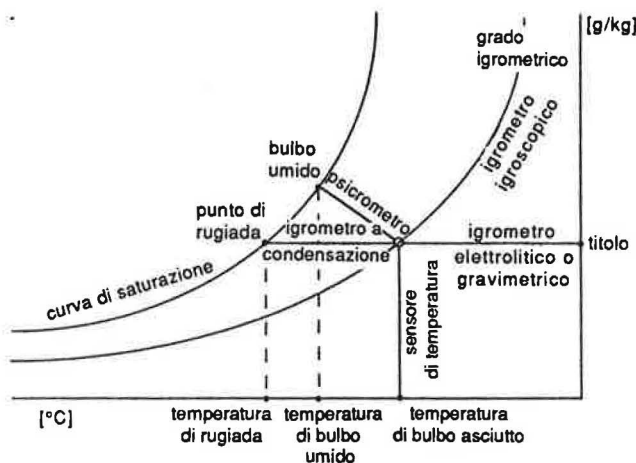
### 1. METODI DI MISURA DELL'UMIDITÀ AMBIENTALE

L'umidità dell'aria può essere espressa e misurata tramite diversi parametri tra loro correlati quali il titolo dell'aria umida, la temperatura di rugiada, il grado igrometrico, la temperatura di bulbo umido ecc., che, nella descrizione termodinamica della miscela aria secca vapore, permettono la valutazione del contenuto di vapor d'acqua. Da un punto di vista strettamente metrologico, la numerosità e diversificazione di tali parametri nasce probabilmente, oltre che dalla giusta

esigenza di quantificare la grandezza termoigrometrica caratterizzante la particolare applicazione, dall'uso spesso consolidato nel tempo di metodologie di misura che vanno poi ad influire sul modo di esprimere il misurando stesso (fig. 1). Non a caso, i parametri succitati corrispondono alle tecniche di misura più diffuse, quali rispettivamente quella gravimetrica o elettrolitica, quella a condensazione (Dew-point), quella igroscopica (meccanica, capacitiva, resistiva) e quella psicrometrica. Situazione questa che non trova corrispondenza nelle misure di altre grandezze e che può ingenerare confusione nel confronto tra le prestazioni metrologiche di differenti strumenti e quindi nella scelta del sensore più idoneo alla specifica situazione.

Una classificazione dei sensori per la misura dell'umidità può essere effettuata sulla base della distinzione tra i diversi parametri igrometrici [1] che vede suddivisi questi ultimi in:

- parametri termoigrometrici, in seguito denominati "relativi" (grado igrometrico  $\varphi$ , grado di saturazione  $\mu$ , umidità relativa U.R.), la cui definizione è funzione



**FIGURA 1**  
*Metodi e parametri di misura dell'umidità dell'aria*

del rapporto tra il valore di una grandezza termodinamica ( $p_v$ ,  $x$ ,  $\rho_v$ ) ed il corrispondente valore assunto dalla grandezza in condizioni di saturazione ( $p_{vs}$ ,  $x_s$ ,  $\rho_{vs}$ ). Parametri questi relativi, che sono un indice della capacità dell'aria umida di assorbire un'ulteriore quantità di vapor d'acqua;

- parametri termoigrometrici, in seguito denominati "assoluti" o "specifici" ( $x$ , ppm, Tr, U.A. e U.S.), che risultano, invece, direttamente correlati alla quantità (in massa o in volume) di vapor d'acqua presente nell'aria umida.

In base a tale suddivisione è possibile distinguere, anche in relazione alla misura, tra "sensori relativi" e "sensori assoluti" a seconda che misurino (in modo diretto) un parametro termoigrometrico relativo od assoluto. Infatti, a seconda dell'applicazione, può risultare conveniente misurare, o controllare, un parametro termoigrometrico assoluto (processi di essiccazione, pesatura, distillazione ecc.) oppure uno relativo (benessere termoigrometrico, industria cartaria, conserviera ecc.). È utile sottolineare che, come qualsiasi altra grandezza, l'umidità può essere misurata in modo diretto, se il segnale di uscita del sensore fornisce il parametro di interesse senza conoscerne esplicitamente altri o, in modo indiretto, assegnando tramite calcolo il valore del parametro di interesse misurandone altri ad esso correlati [2]. In quest'ultimo caso l'incertezza totale della misura (indiretta) risulta funzione delle singole incertezze di misura e della incertezza connessa alla relazione utilizzata.

La classificazione sopra riportata, unita alla approfondita conoscenza delle singole metodologie di misura, può essere di aiuto nella scelta del sensore.

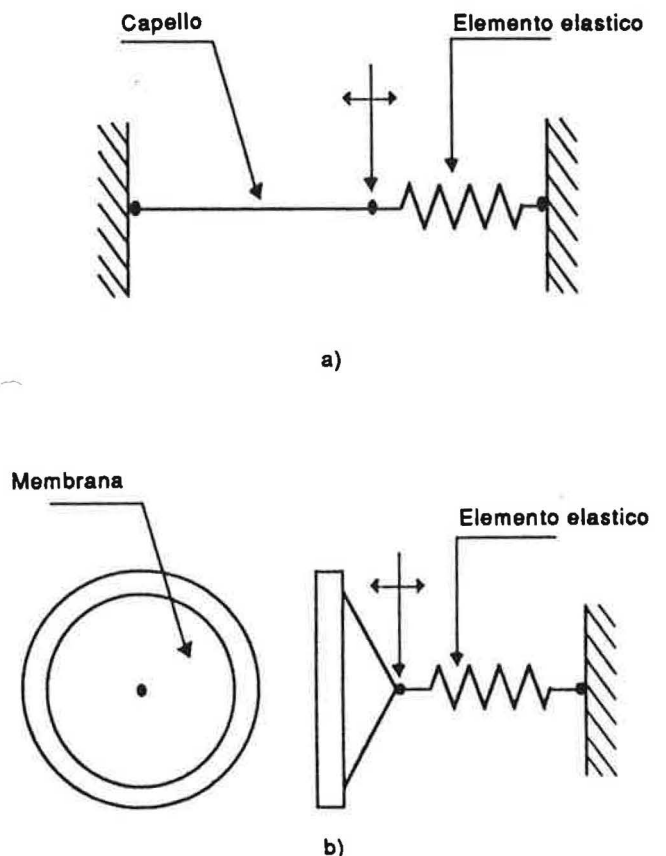
Un'ulteriore utile classificazione dei sensori di umidità ambientale è quella ottenuta sulla base del principio di misura:

- sensori igroscopici (meccanici, elettrici, piezoelettrici);
- sensori elettrolitici;
- sensori a condensazione;
- sensori psicrometrici.

### Sensori igroscopici

I sensori di umidità igroscopici sono gli igrometri tecnologicamente e funzionalmente più semplici e, per tale motivo, hanno un costo relativamente basso. A tale categoria appartengono gli igrometri a rilevazione meccanica (sensori relativi) basati sulla variazione dimensionale di un materiale fortemente igroscopico (fibre organiche e sintetiche - fig. 2) in funzione del grado igrometrico [3].

Per tali dispositivi il campo di misura tipico è di



**FIGURA 2**  
*Sensori di umidità igroscopici a rilevazione meccanica: a) a cappello; b) a membrana*

30+90% di  $\varphi$ , per temperature comprese tra 0 e 40°C, con un'incertezza di misura ed una ripetibilità dell'ordine di  $\pm 5\%$ .

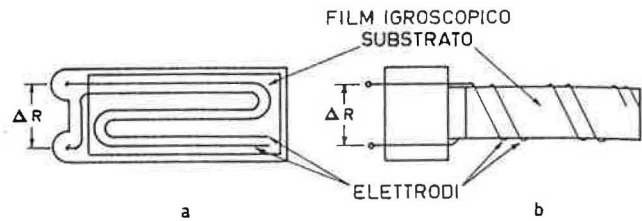
Gli igrometri elettrici (sensori generalmente classificabili come relativi) sfruttano anch'essi i fenomeni di adsorbimento o assorbimento, rilevando la variazione di una proprietà elettrica del materiale assorbente quale la resistenza, la capacità o più in generale l'impedenza con l'umidità assorbita (fig. 3). I sensori industrialmente più utilizzati sono quelli al cloruro di litio [4-7], i polimerici [8] ed i ceramici all'ossido di alluminio [9,10]. Il campo di misura tipico è di 10+95% di  $\varphi$ , eccezion fatta per quelli all'ossido di alluminio (di tipo assoluto) che normalmente presentano un campo di misura compreso tra 0,01+200.000 ppm<sub>v</sub>. L'incertezza di misura è tipicamente pari a  $\pm 2+3\%$ , tranne che per quelli all'ossido di alluminio che presentano incertezze anche inferiori. Il tempo di risposta caratteristico delle singole tecniche è molto variabile a seconda della fenomenologia di assorbimento (adsorbimento o assorbimento) e varia da alcuni secondi a diversi minuti. La miniaturizzazione ed il basso costo restano comunque le più valide caratteristiche di tali sensori, mentre l'elevata sensibilità alla contaminazione superficiale ed alla temperatura costituisce il loro maggiore limite applicativo.

Un particolare tipo di sensore igroscopico elettrico può essere considerato quello piezoelettrico, basato sulla variazione della frequenza di oscillazione naturale di un elemento in quarzo ricoperto di un film igroscopico, la massa del quale varia in funzione dell'umidità. Tali igrometri consentono di misurare l'umidità nel campo 0+20.000 ppm<sub>v</sub> e sono quindi classificabili come assoluti [3].

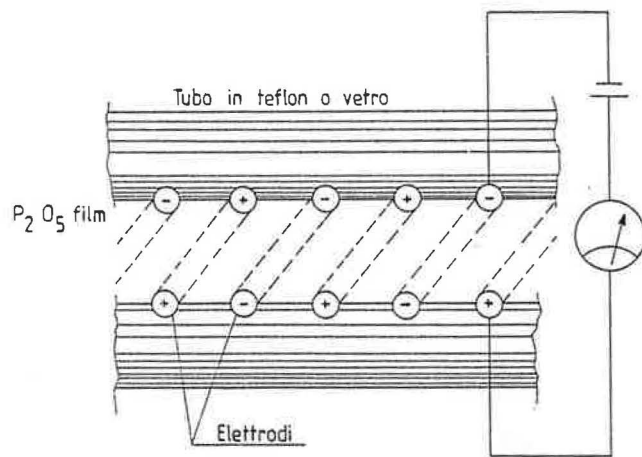
#### Sensori elettrolitici

Tali strumenti di misura dell'umidità, talvolta anche denominati igrometri coulombmetrici, sono specificamente utilizzati per misure in ambienti con basso tenore di vapor d'acqua. Essi sono generalmente costituiti da un avvolgimento bifilare di elettrodi inerti posto sulla superficie interna di un capillare di vetro o teflon rivestito di un film igroscopico di pentossido di fosforo (fig. 4).

Per la classificazione proposta essi sono sensori assoluti e consentono misure nel campo 0,1+1.000 ppm<sub>v</sub>, con un campo di impiego in temperatura tra 0 e 50°C, un'incertezza di  $\pm 5\%$  ed un tempo di risposta dell'ordine del minuto. Essi hanno il vantaggio di poter misurare umidità in gas molto secchi, ma presentano alcuni inconvenienti, tra cui la sensibilità alla contaminazione superficiale ed alla temperatura, la



**FIGURA 3**  
Sensore a variazione di impedenza: a) configurazione piana; b) configurazione cilindrica

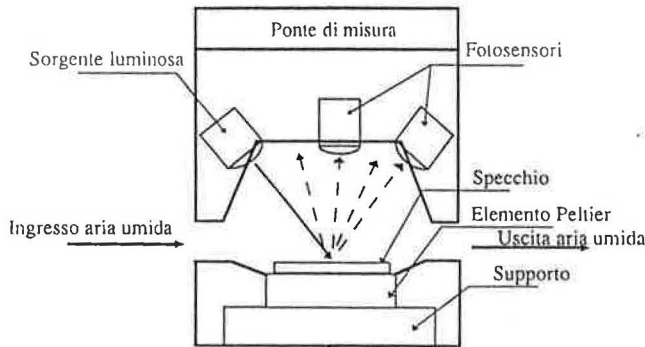


**FIGURA 4**  
Sensore elettrolitico

necessità di misura e controllo della portata d'aria umida elaborata dal sensore nella misura, e la ricombinazione dell'acqua elettrolizzata [10].

#### Sensori a condensazione

Tali igrometri si basano sulla misura della temperatura nel punto di incipiente condensazione del campione di aria umida oggetto della misura; detta temperatura rappresenta la temperatura di rugiada o di brina. Esistono svariate tipologie di strumenti che si differenziano tra loro essenzialmente per le tecniche di rilevazione dell'incipiente condensazione del vapor d'acqua. I metodi di rilevazione commercialmente utilizzati sono quelli ottici, quelli capacitivi e quelli al cloruro di litio a condensazione (fig. 5). Nei primi si rileva la variazione di intensità della luce riflessa da uno specchio su cui, tramite opportuno raffreddamento, avviene la condensazione. In quelli a rilevazione capacitiva l'incipiente condensazione viene invece rilevata attraverso la conseguente brusca variazione di capacità elettrica dell'elemento raffreddato. Infine gli igrometri al cloruro di litio (a condensazione)



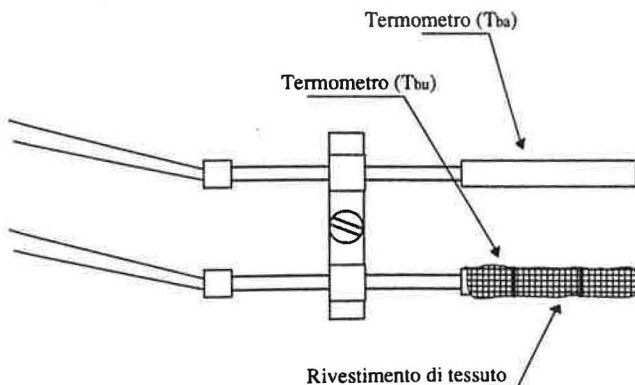
**FIGURA 5**  
Sensore a condensazione

sono basati sulla misura della temperatura di saturazione di una soluzione acquosa di cloruro di litio riscaldata da un avvolgimento resistivo. Gli igrometri a condensazione consentono di effettuare misure di temperatura di rugiada mediamente nell'intervallo  $-40+100^{\circ}\text{C}$ , con tempi di risposta di circa un minuto ed incertezze variabili tra  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  e  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ; solo con gli igrometri a condensazione ottica è possibile ottenere incertezze dell'ordine di  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$  [3] [10-13].

#### Sensori psicrometrici

I sensori di umidità psicrometrici sono stati i dispositivi maggiormente utilizzati nel campo delle misure e dei collaudi degli impianti di condizionamento ambientale. Lo strumento di misura è costituito da una coppia di sensori di temperatura, di cui uno rivestito di un manicotto impregnato d'acqua in fase liquida, l'altro mantenuto asciutto che investiti dalla corrente di aria umida all'equilibrio si portano a temperature differenti (fig. 6). Tale differenza risulta proporzionale all'umidità presente nell'ambiente. Il campo di misu-

**FIGURA 6**  
Sensore psicrometrico



ra è  $10+99\%$  di  $\varphi$ ,  $-30+100^{\circ}\text{C}$  in termini di  $t_{bu}$ , con un incertezza compresa tra  $\pm 1+3\%$  di  $\varphi$  e  $\pm 1+0,5^{\circ}\text{C}$  in termini di  $t_{bu}$  [14].

In tabella I sono riportate sinteticamente le prestazioni metrologiche, nonché i limiti di applicazione relativi ai metodi di misura più diffusi nelle misure dirette di umidità ambientale.

## 2. VALUTAZIONE DELLE INCERTEZZE NELLE MISURE DI UMIDITÀ

La diversificazione e numerosità dei parametri di misura dell'umidità comportano, come detto, l'impossibilità di confrontare direttamente le prestazioni metrologiche dei differenti igrometri presenti sul mercato. D'altro canto l'esigenza di valutare il parametro termoigrometrico di interesse, anche attraverso la misura indiretta di altre grandezze ad esso correlate, richiede una esplicita conoscenza delle leggi di propagazione delle incertezze di misura per valutare in termini statistici l'affidabilità della misura ottenuta [15].

Tali considerazioni spingono ad effettuare un'analisi delle relazioni più comunemente adottate per correlare i diversi parametri termoigrometrici, al fine di valutare le incertezze connesse all'utilizzo delle stesse. Infatti, per le note leggi di propagazione, è possibile esprimere l'incertezza totale  $\sigma_y$  associata ad una misura indiretta  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  come funzione delle singole incertezze  $\sigma_{x_i}$  (con  $i = 1 + n$ ):

$$\sigma_y^2 = \left( \frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left( \frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \sigma_{x_n}^2 \quad (1)$$

Da cui si può facilmente ricavare l'incertezza in termini relativi  $z\xi_y$ :

$$\xi_y^2 = \left( \frac{x_1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \xi_{x_1}^2 + \left( \frac{x_2}{y} \frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \xi_{x_2}^2 + \dots + \left( \frac{x_n}{y} \frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \xi_{x_n}^2 \quad (2)$$

e cioè:

$$\xi_y^2 = \pi_{x_1} \xi_{x_1}^2 + \pi_{x_2} \xi_{x_2}^2 + \dots + \pi_{x_n} \xi_{x_n}^2 \quad (3)$$

con  $\pi_{x_i}$  coefficienti di peso.

Dalle (1), (2), e (3) si evince che l'incertezza totale in una misura indiretta è funzione delle singole incertezze, pesate secondo degli opportuni coefficienti di pe-

**tabella I - principi di misura e criteri di scelta**

Principio di misura	Misurando	Campo di misura	Campo di Impiego in temperatura (°C)	Incertezza di misura	Tempo di risposta (s)	Montaggio	Tipo di misura	Vantaggi/Svantaggi
igroscopico a rilevazione di impedenza ad Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ppm,	0,01+200.000	-30+70	±2+3°C	10+20	con prelevamento	assoluto	<ul style="list-style-type: none"> <li>* buoni tempi di risposta</li> <li>* utilizzabile anche per misure in liquidi</li> <li>* sensibile alla contaminazione superficiale</li> <li>* poco stabile (deriva della caratteristica)</li> <li>* sensibili alla temperatura</li> </ul>
igroscopico a rilevazione piezoelettrica	ppm,	0+20.000	—	±0,1+2%	—	con prelevamento	assoluto	<ul style="list-style-type: none"> <li>* dimensioni ridotte</li> <li>* sensibile alla contaminazione superficiale e ad agenti chimici contaminanti</li> </ul>
elettrolitico al P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ppm,	0,1+1.000	0+50	±5%	60	con prelevamento	assoluto	<ul style="list-style-type: none"> <li>* utilizzabile per gas molto secchi</li> <li>* sensibile alla contaminazione superficiale e ad agenti chimici contaminanti (reattivi con il pentossido di fosforo)</li> <li>* sensibile alla temperatura per la ricombinazione dell'acqua idrolizzata</li> <li>* necessita di controllo della portata d'aria</li> </ul>
a condensazione con rilevazione ottica	T <sub>r</sub>	-70+100°C	-70+100	±0,2°C	1°C/s	in situ in linea con prelevamento	assoluto	<ul style="list-style-type: none"> <li>* ottima precisione</li> <li>* elevata complessità costruttiva</li> <li>* elevato costo</li> <li>* sensibile alla contaminazione superficiale (sali)</li> </ul>
a condensazione con rilevazione capacitiva	T <sub>r</sub>	-15+170°C	-15+170	±0,5 +1°C	—	con prelevamento	assoluto	<ul style="list-style-type: none"> <li>* buona precisione</li> <li>* sensibile alla contaminazione superficiale (sali)</li> <li>* buon rapporto costo/prestazioni</li> </ul>
a condensazione con sali saturi (LiCl)	T <sub>r</sub>	-40+100°C	-30+70	±0,5 +1,5°C	10+180	—	assoluto	<ul style="list-style-type: none"> <li>* basso costo</li> <li>* non utilizzabile per φ minori di 15%</li> <li>* poco sensibile alla contaminazione superficiale</li> <li>* necessita di frequenti rigenerazioni e calibrazioni (circa ogni 3 mesi)</li> </ul>
psicrometrico	T <sub>bu</sub> , T <sub>ba</sub>	10+99% -30+100°C	0+60	±1+3% ±0,1+0,5°C	—	in ambiente in situ	assoluto e relativo	<ul style="list-style-type: none"> <li>* notevole complessità costruttiva</li> <li>* necessita di controllo della portata d'aria</li> <li>* non utilizzabile per basse temperature</li> </ul>
igroscopico a rilevazione meccanica	φ	30+90%	0+40	±3+5%	—	in situ talvolta in linea	relativo	<ul style="list-style-type: none"> <li>* basso costo</li> <li>* semplicità costruttiva</li> <li>* necessita di frequente calibrazione</li> <li>* sensibile alla contaminazione superficiale</li> <li>* poco affidabile</li> <li>* inutilizzabile in presenza di vibrazioni</li> </ul>
igroscopico a rilevazione di impedenza (LiCl)	φ	10+95%	-40+60	±2+3%	120+300	in situ in linea con prelevamento	relativo	<ul style="list-style-type: none"> <li>* dimensioni ridotte</li> <li>* elevata sensibilità</li> <li>* sensibile alla contaminazione superficiale</li> <li>* necessita di rigenerazione e calibrazione</li> <li>* span di misura limitato, ma utilizzabili sensori multielemento</li> <li>* sensibile alla temperatura</li> </ul>
igroscopico a rilevazione di resistenza polimerico	φ	15+95%	-10+50	±2+3%	30+120	in situ in linea con prelevamento	relativo	<ul style="list-style-type: none"> <li>* dimensioni ridotte</li> <li>* solubilità del polimero in acqua o in condizioni di saturazione</li> <li>* sensibile alla contaminazione superficiale e ad agenti chimici contaminanti</li> <li>* sensibile alla temperatura</li> </ul>
igroscopico a rilevazione di capacità polimerico	φ	10+95%	-50+180	±1+2%	10+60	in situ in linea con prelevamento	relativo	<ul style="list-style-type: none"> <li>* dimensioni ridotte</li> <li>* buoni tempi di risposta</li> <li>* poco sensibile alla temperatura</li> <li>* sensibile alla contaminazione superficiale e ad agenti chimici contaminanti</li> <li>* solubilità del polimero in acqua o in condizioni di saturazione</li> </ul>
igroscopico a rilevazione di impedenza a film di C	φ	10+100%	—	—	1+5	—	relativo	<ul style="list-style-type: none"> <li>* basso costo</li> <li>* sensibile alla contaminazione superficiale</li> </ul>
igroscopico a rilevazione di impedenza ceramico	φ	30+90% (1+100%)	0+150	±2+3%	10+120	in situ in linea	relativo	<ul style="list-style-type: none"> <li>* basso costo</li> <li>* utilizzabile per elevate temperature</li> <li>* poco sensibile alla contaminazione superficiale</li> <li>* stabile chimicamente e fisicamente</li> </ul>

so  $\pi_{x_i}$  ricavabili dalle relazioni che correlano i parametri di interesse. Tali pesi consentono di valutare, per assegnate condizioni, l'incertezza totale di una misura indiretta e quindi di confrontare le differenti prestazioni metrologiche associate ai diversi metodi di misura diretti ed indiretti. L'espressione di tali coefficienti in forma chiusa è di non facile interpretazione in quanto essi risultano funzione delle condizioni termodinamiche dell'ambiente di misura. Per maggiore semplicità e facilità di interpretazione l'andamento di detti coefficienti è stato anche riportato in forma grafica. Un'analisi accurata non può, comunque, prescindere dalla approssimazione del modello fisico utilizzato e quindi dall'incertezza della corrispondente relazione matematica, di solito scelta in base alla semplicità ed alla velocità di calcolo.

In tabella II viene riportato un prospetto sintetico delle

relazioni esistenti tra i parametri termoigrometrici maggiormente utilizzati nella pratica, utili alla determinazione delle incertezze relative nelle misure indirette. In seguito sarà pertanto effettuata una disamina sistematica dei singoli fattori su evidenziati ed un esempio di calcolo relativo alla misura indiretta del titolo  $x$  a partire dalle misure di temperatura, grado igrometrico e pressione.

### 2.1. Calcolo dell'incertezza di una misura indiretta di un parametro igrometrico assoluto a partire da uno relativo

La misura indiretta del titolo può essere effettuata a partire da differenti parametri e relazioni così come evidenziato in tabella II.

Come caso particolare viene esaminata la misura indiretta del titolo attraverso una misura di  $T$ ,  $\varphi$  e  $p$ . Per ottenere tale misura è possibile utilizzare la relazione  $x = x(\varphi, T, p)$  illustrata in tabella II, valida nell'ipotesi di comportamento da gas perfetto, ipotesi quest'ultima verificata sia per l'aria secca che per il vapore. In realtà l'adozione di tale modello comporta un errore massimo dell'ordine di  $\pm 1\%$  nel campo  $t = 18 \pm 60^\circ\text{C}$  e  $p = 33,8 + 108 \text{ kPa}$  [16]. In letteratura sono però disponibili relazioni più accurate basate sull'uso di un fattore di correzione  $f_s$  (*enhancement factor*) che tiene conto della quantità di aria disciolta in acqua liquida, della pressione totale e delle interazioni molecolari [17]. Il contributo di tali interazioni può essere in prima approssimazione considerato trascurabile, in quanto il fattore di comprimibilità del vapore, in corrispondenza di un intervallo di temperatura  $0 + 100^\circ\text{C}$  e quindi di una tensione di vapore saturo compresa tra  $6,113 \cdot 10^{-4}$  e  $1,0135 \cdot 10^{-1} \text{ MPa}$ , assume valori compresi tra 0,998 e 0,984 [18]. Dalla relazione (4) si evince inoltre che, nel caso di un notevole scostamento della composizione dell'aria secca da quella convenzionale (a causa di fattori inquinanti o di particolari condizioni

tabella II - principali relazioni per il calcolo delle misurazioni indirette dell'umidità

Misura indiretta	Misura diretta	Relazioni
$x$	$\varphi, T, p$	$x = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{\varphi \cdot p_{vs}(T)}{p - \varphi \cdot p_{vs}(T)}$
$x$	$T, p$	$x = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{p_{vs}(T)}{p - p_{vs}(T)}$
$x$	$T_{bu}, T, p$	$x = \frac{[h_{g,ref} - (c_{pw} - c_{pv}) \cdot t_{bu}] x_s - c_{ps} \cdot (t - t_{bu})}{h_{g,ref} + c_{pv} \cdot t - c_{pw} \cdot t_{bu}}$
$x$	$\mu, T, p$	$x = \mu \cdot x_s(T, p)$
$\varphi$	$T, T$	$\varphi = \frac{p_{vs}(T)}{p_{vs}(T)}$
$\varphi$	$x, T, p$	$\varphi = \frac{p}{p_{vs}(T) \cdot \left(1 + \frac{M_v}{M_a x}\right)}$
$\varphi$	$T_{bu}, T, p$	$\varphi = \frac{p}{p_{vs}(T) \cdot \left(1 + \frac{M_v}{M_a \cdot x(T_{bu}, T, p)}\right)}$
$\varphi$	$\mu, T, p$	$\varphi = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu) \cdot p_{vs}(T)/p}$

climatiche), è necessario ricalcare il peso molecolare medio. L'incertezza connessa ai pesi molecolari è quindi trascurabile nella gran parte dei problemi di condizionamento ambientale, sempre per il vapore d'acqua, e generalmente per l'aria secca. È però opportuno sottolineare che, mentre le quantità di N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar presenti in quest'ultima sono abbastanza stabili, la percentuale di CO<sub>2</sub> mostra talvolta apprezzabili variazioni locali, funzioni della vegetazione, delle condizioni meteorologiche, della temperatura superficiale degli oceani, e nel caso di condizionamenti ambientali dell'affollamento dei locali.

Ciò premesso, è possibile verificare, in base alla (2) e (3), che i coefficienti di peso  $\pi_\phi$ ,  $\pi_T$  e  $\pi_p$  assumono rispettivamente le seguenti espressioni:

$$\pi_\phi = \left(1 + \frac{M_a}{M_v} x\right)^2 \quad (4)$$

$$\pi_T = \left(1 + \frac{M_a}{M_v} x\right)^2 \left(-\frac{C_1}{T} + C_3 T + 2C_4 T^2 + 3C_5 T^3 + C_6\right)^2 \quad (5)$$

$$\pi_p = \left(1 + \frac{M_a}{M_v} x\right) \quad (6)$$

dove il  $\pi_T$  è un coefficiente empirico calcolato in base alla nota relazione di Hyland e Wexler [19]:

$$\ln(p_{vs}) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 \ln(T) \quad (7)$$

valida per  $T = 273.15 + 473.15$  K, con  $p_{vs}$  espressa in Pa e con le costanti  $C_i$  che assumono i seguenti valori:

$$C_1 = -5.800\,220\,6 \cdot 10^3$$

$$C_2 = 1.391\,499\,3$$

$$C_3 = -4.864\,023\,9 \cdot 10^{-2}$$

$$C_4 = 4.176\,476\,8 \cdot 10^{-5}$$

$$C_5 = -1.445\,209\,3 \cdot 10^{-8}$$

$$C_6 = 6.545\,967\,3$$

Come si evince dalla figura 7 e dalla relazione (4), il coefficiente di peso  $\pi_\phi$  connesso all'incertezza del titolo  $x$  derivante dall'incertezza nella misura di  $\phi$  è una funzione crescente del titolo  $x$  ed è compreso tra 1 e 1.17 in corrispondenza dei valori di  $x$  variabili tra 0+0.050.

Un andamento analogo al peso  $\pi_\phi$  risulta peraltro avere il peso  $\pi_p$  derivante dall'incertezza nella misura

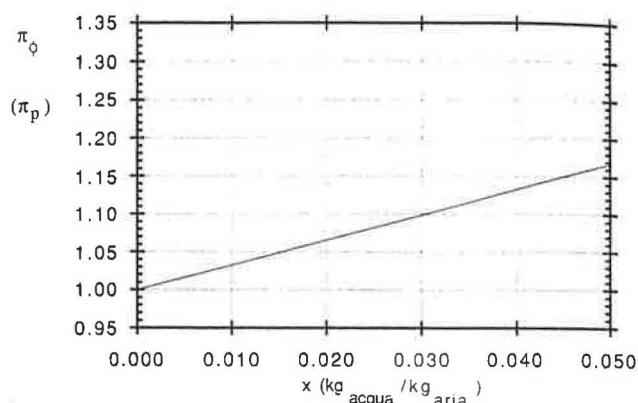
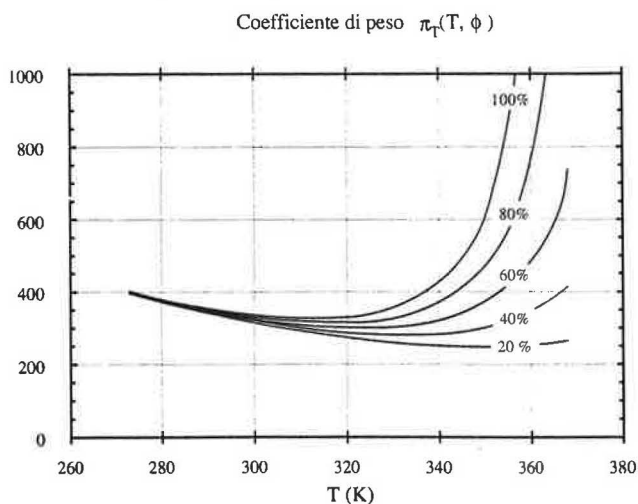


FIGURA 7  
Coefficiente di peso  $\pi_\phi$  e  $\pi_p$  in funzione di  $x$

della pressione. Nella maggior parte delle applicazioni, viste le modeste variazioni caratteristiche della pressione, tale influenza può ritenersi trascurabile.

Per quanto riguarda invece il peso  $\pi_T$  sull'incertezza connessa alla valutazione del titolo  $x$  derivante dall'incertezza nella misura di  $T$  è facile verificare che i valori assunti sono notevolmente superiori (almeno due ordini di grandezza) a quelli assunti da  $\pi_\phi$  e  $\pi_p$  (fig. 8). Pertanto, nella misura indiretta del titolo dell'aria umida, l'incertezza connessa alla misura della temperatura è quella che influisce maggiormente rispetto a quella relativa alla misura del grado igrometrico e della pressione. La preponderanza di tale influenza permane nonostante le incertezze dei sensori di temperatura siano tipicamente inferiori

FIGURA 8  
Coefficiente di peso  $\pi_T$  in funzione di  $T$  e  $\phi$  a  $p = 101 \cdot 325$  Pa





( $\pm 0,1 + 1,0^\circ\text{C}$ ) a quelle degli igrometri relativi ( $\pm 2 + 3\%$ ). Resta comunque da evidenziare che l'andamento di  $\pi_r(T, \varphi, p)$  in funzione della temperatura presenta un minimo in corrispondenza del campo di interesse tipico del condizionamento ambientale ( $0 < t < 50$ ).

### 3. CRITERI DI SCELTA

La scelta più opportuna del sensore di una generica grandezza è sempre strettamente connessa alla approfondita conoscenza delle metodologie disponibili e dei loro limiti metrologici ed applicativi [20, 21]. Nel caso specifico della misura dell'umidità ambientale la scelta risulta anche condizionata dalla possibilità di

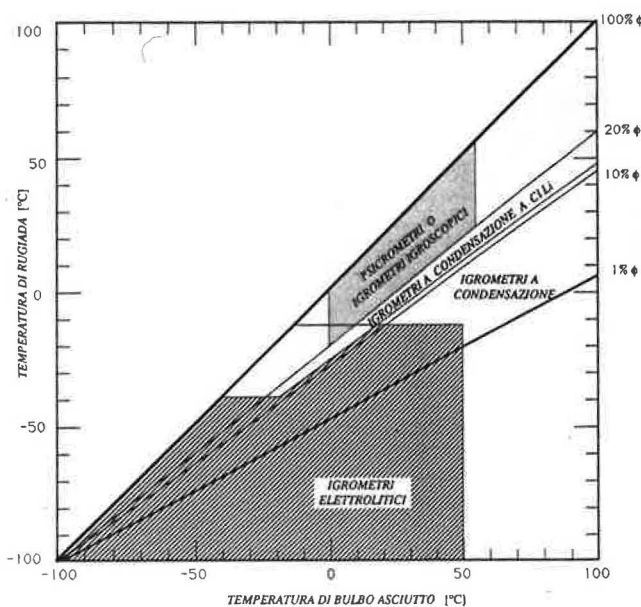
dati di misura così come riportato nei paragrafi precedenti. Bisogna tuttavia evidenziare che a volte una misura diretta di un parametro relativo (tipicamente  $\varphi$ ) può risultare irrealizzabile con incertezze accettabili, specie agli estremi del campo di misura (valori di  $\varphi$  inferiori al 5-10% e superiori al 95%) a causa delle limitazioni tecnologiche connesse alla realizzazione dei sensori relativi. In particolare, per piccoli valori di  $\varphi$  risulta preferibile utilizzare o sensori a condensazione o elettrolitici i quali sono i soli che industrialmente sono in grado di apprezzare concentrazioni di vapor d'acqua anche di poche ppm. Per elevati valori di  $\varphi$  è invece consigliabile l'uso di sensori a condensazione o di psicometri particolarmente precisi, quali quelli ad aspirazione controllata. In figura 9 sono sinteticamente evidenziati i campi di misura caratteristici delle differenti metodologie relativamente ad un parametro relativo  $\varphi$  ed uno assoluto  $T$ , (o ppm, per bassi valori di umidità). Dalla figura si evince non solo l'applicabilità di un sensore ad un particolare campo di misura, ma più in generale per assegnate condizioni termodinamiche.

La limitazione di un sensore rispetto ad un determinato campo di misura deriva però, il più delle volte, più che da un limite fisico, da valori dell'incertezza inadeguati sull'intero campo. L'incertezza di misura risulta infatti generalmente funzione del tenore di umidità o meglio del valore di misura. Accanto a tale incertezza di tipo accidentale, caratteristica del sensore e solitamente dichiarata dal costruttore, è necessario tener conto di altri fattori che possono contribuire all'incertezza e tali che, seppur classificabili come sistematici, risultano il più delle volte non quantizzabili.

Situazione quest'ultima che ha sempre più favorito l'utilizzo di sensori selettivi, e cioè di sensori che mostrano una notevole insensibilità rispetto alle grandezze di influenza quali: temperatura e pressione.

Il caso della misura dell'umidità dell'aria risulta peculiare in tal senso in quanto i parametri temperatura e pressione sono intrinsecamente correlati alle diverse grandezze di misura mediante le quali è possibile esprimere l'umidità. In particolare in campo sensoristico una loro variazione comporta sia una deriva della caratteristica (e in tal senso risultano essere, in termini metrologici, grandezze di influenza), sia una variazione della grandezza di misura, specie se il parametro oggetto della misura è un parametro relativo. Pertanto per ogni sensore di umidità sono di solito forniti i campi di impiego in temperatura e pressione all'interno dei quali le connesse variazioni delle curve caratteristiche possono ritenersi trascurabili, o

FIGURA 9  
Campi di applicabilità in termini di  $\varphi$  e  $T_r$  [20]



effettuare la valutazione del parametro termoigrometrico di interesse utilizzando sensori di grandezze diverse, non sempre direttamente collegate alle specifiche fenomenologie ed il cui valore (segnale di uscita del sensore) è correlabile al parametro di interesse, tramite opportune relazioni spesso fornite acriticamente "a menù" nella stessa elettronica di misura. Questa è la ragione per cui è sempre preferibile nelle misure di umidità dell'aria utilizzare, laddove possibile, tecniche di misura dirette che più facilmente soddisfano i requisiti metrologici e più difficilmente conducono ad errori di non corretta interpretazione dei

risultare comunque compensabili o correggibili, tramite opportuni coefficienti di zero e della sensibilità.

Accanto a tali incertezze debbono comunque essere tenute in debito conto le incertezze di installazione, quali: la presenza di vibrazioni nel caso di igrometri meccanici e l'incertezza associata al controllo del flusso di aria nel caso di igrometri a prelevamento; unite alle fenomenologie connesse allo sporcamento superficiale e all'incompatibilità fisica o chimica del sensore con l'ambiente di misura, fenomenologie che incidono notevolmente sulla stabilità a medio e lungo termine del generico sensore.

Dal punto di vista delle prestazioni bisogna, infine, sottolineare la scarsa idoneità dei sensori fortemente intrusivi alle misure in ambienti di dimensioni ridotte, dove rilevanti scambi di massa e di energia non possono essere tollerati, per la conseguente alterazione delle condizioni di misura.

Un fattore critico nelle misure dell'umidità risulta anche essere il tempo di risposta che può assumere un ruolo chiave nella scelta del sensore, specie nei casi in cui occorre monitorare situazioni instazionarie. Esso può variare da pochi secondi a diversi minuti in funzione sia della fenomenologia di assorbimento, sia delle caratteristiche fisiche del materiale, sia del moto relativo aria-sensore.

Un'oculata scelta del dispositivo di misura più idoneo non può, comunque, prescindere da ulteriori fattori impiantistici ed economici quali: il tipo di misura (continua o discontinua), la modalità di installazione, la necessità di calibrazione, la facilità di manutenzione e riparazione ed infine il rapporto costo/prestazioni.

Considerazioni che possono, talvolta, suggerire l'utilizzo di sensori relativi tipicamente meno complessi e costosi di quelli assoluti, anche dove sarebbe necessaria la misura di un parametro assoluto, anche se per quanto detto ciò comporta la necessità di misurare con notevole precisione la temperatura.

Per quanto concerne infine la misura ed il controllo dell'umidità in continuo, particolare importanza riveste il tipo di montaggio caratteristico della metodologia utilizzata ed il moto relativo aria-sensore, quando questo venga richiesto. Le misure di umidità, infatti, possono effettuarsi, a seconda del principio di misura, sia su di un campione di aria in quiete, sia in presenza di un flusso di aria umida. In particolare si ha una misura "in situ" o "in ambiente" quando il sensore può essere montato direttamente nell'ambiente di misura in presenza di aria in quiete. Si parla invece di misura "in linea", quando si è in presenza di moto relativo aria-sensore. In taluni casi le condizioni di fun-

zionamento del sensore possono richiedere per il corretto funzionamento una misura "con prelevamento". È bene considerare che in quest'ultima situazione devono essere valutate le possibili variazioni dello stato termodinamico dell'aria umida durante il passaggio nei condotti di prelievo, causate, ad esempio, da fenomeni di condensazione sulle pareti che possono determinare nel campione prelevato un tasso d'umidità profondamente diverso da quello originario. In tabella I sono riportate sinteticamente le caratteristiche metrologiche e le limitazioni impiantistiche dei singoli principi di misura.

Negli ultimi anni, grazie alle moderne tecniche elettroniche, sono stati realizzati sensori con possibilità di autocalibrazione ed autodiagnostica (con segnale di stato sovrapposto), inoltre si va sempre più affermando l'esigenza di mantenere e riparare con il minimo sforzo tale strumentazione; ciò ha favorito la diffusione di elementi modulari e quindi di facile intercambiabilità [22].

#### Ringraziamenti

Tale lavoro è stato effettuato nell'ambito del progetto di ricerca MURST 40% (Termoigrometria dei componenti edilizi industrializzati). Gli autori desiderano ringraziare i proff. G. Alfano e V. Betta per l'incoraggiamento e gli utili suggerimenti.

#### Bibliografia

- [1] A. Carotenuto, D. Cerra, M. Dell'Isola, Misura e controllo dell'umidità ambientale: limiti, applicazioni e futuri sviluppi, *Fisica e Tecnologia*, in corso di pubblicazione.
- [2] *Norma UNI 4546*, Misure e misurazioni - Termini e definizioni fondamentali.
- [3] H. N. Norton, *Handbook of Transducers*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall Inc, 1989.
- [4] N. Yamazoe, Y. Schimizu, Humidity sensors: principles and applications, *Sensors and Actuators*, 10, 379-398, 1986.
- [5] F. W. Dunmore, An electrometer and its application to radio meteorography, *J. Res. Nat. Bur. Std.*, 20, 723-744, 1938.
- [6] F. W. Dunmore, An improved electric hygrometer, *J. Res. Nat. Bur. Std.*, 23, 701-714, 1939.
- [7] R. L. Opila, C. J. Wescheler, R. Schubert, Acidic vapors above saturated salt solutions commonly used for control of humidity, *IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing technology*, 12, 1, 114-120, 1989.
- [8] G. Delapierre, H. Grange, B. Chambaz, L. Destannes, Polymer-based capacitive humidity sensor: characteristics and experimental results, *Sensors and Actuators*, 4, 97-104, 1983.
- [9] C. John, Jr. Harding (Eastern Instruments Corporation), Overcoming limitations of humidity sensors, *Proceedings of the International Symposium on Moisture and Corrosion*, April, Washington D.C., 1985.