

neO EUBIOS

bene et commode vivens

ISSN 1825-5515



58

ANALISI IGROTERMICA: CALCOLO IN REGIME STAZIONARIO VS REGIME DINAMICO

di

* Alessandra Mesa, Margherita Mor, Alberto Arenghi

La trasmissione di vapore attraverso l'involucro opaco è un tema di non semplice trattazione che può dar luogo, se trascurato in ambito progettuale, a problemi legati alla formazione di condensa nell'ambito della stratigrafia dell'involucro e di formazione di muffe. Tali fenomeni determinano vari problemi che vanno dal danneggiamento, alla perdita delle caratteristiche isolanti dell'involucro fino al discomfort ambientale. Il tema può essere affrontato seguendo due norme UNI.

La norma UNI EN ISO 13788 [4] propone metodologie semplificate, per il calcolo di condensazione interstiziale, superficiale e muffa, che considerino solo il trasporto di vapore per diffusione e l'uso di dati climatici medi mensili. Questo metodo semplificato trascura altre fonti di umidità, quali penetrazione della pioggia o il fenomeno di convezione. Il software PAN fornisce un calcolo predittivo basandosi sulle semplificazioni contenute nella norma UNI EN ISO 13788 ed esegue quindi un calcolo stazionario. Esistono però altri metodi, più accurati, per stabilire l'idoneità di un pacchetto stratigrafico. La UNI EN 15026 [5], norma europea recepita a livello nazionale, fornisce le equazioni da utilizzare per il calcolo del trasferimento di calore e umidità nelle strutture, in regime dinamico. WUFI è uno dei software di simulazione, sviluppato in accordo con essa, e che quindi compie un calcolo dinamico.

Nel presente scritto si analizzano gli algoritmi del calcolo dinamico e del calcolo stazionario utilizzati dai due software. Si evidenzia, inoltre, quanto incidano i fenomeni igroscopici considerati nel calcolo dinamico e trascurati viceversa in un calcolo stazionario. In particolare si pone attenzione al contributo del calore latente e del trasporto capillare.

Una comprensione più approfondita degli algoritmi che governano i metodi di calcolo può essere uti-

le per scegliere in modo consapevole quale metodo di calcolo utilizzare a seconda dell'analisi che si sta conducendo.

1. Metodi di calcolo

Con riferimento agli algoritmi di calcolo, i due programmi si basano sulla legge di conservazione del calore e sulla legge del trasporto di umidità. L'analisi dinamica di WUFI si basa su un calcolo che, non solo tiene conto di più fenomeni rispetto all'analisi stazionaria di PAN, ma presenta parametri variabili in funzione di umidità relativa e contenuto d'umidità. Queste differenze sono dovute anche alle diverse normative cui fanno riferimento:

- il calcolo dinamico fa riferimento alla norma UNI EN 15026, "Prestazione termoigrometrica dei componenti e degli elementi di edificio. Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica"

- il calcolo stazionario fa riferimento alla norma UNI EN ISO 13788, "Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per l'edilizia. Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale. Metodi di calcolo"

Gli algoritmi di calcolo fanno riferimento alla legge di conservazione del calore e alla legge del trasporto di umidità, le quali, sia in un calcolo stazionario che in un calcolo dinamico, si presentano come un'equazione che da una parte individua la capacità di assorbimento di calore e umidità del materiale e dall'altra la capacità di trasporto degli stessi.

1.1 Legge di conservazione del calore

Secondo la UNI EN 15026 nella legge di conservazione del calore, o equazione di Fourier, si vedono uguagliati la potenza termica immagazzinata per

unità di volume alla potenza termica generata per unità di volume:

$$[c_m\rho + c_w w(\varphi)] \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial(q_{sens} + q_{lat})}{\partial x} \quad (1)$$

- $c_m\rho$ rappresenta la capacità termica volumetrica del materiale secco. È dato dal calore specifico del materiale secco moltiplicato per la sua densità;
- $c_w w$ rappresenta la capacità termica volumetrica dell'acqua. È dato dal calore specifico dell'acqua moltiplicato per il contenuto d'umidità in massa su unità di volume;
- $q_{sens} = -\lambda(w) \frac{\partial T}{\partial x}$ è il flusso di calore sensibile, cioè la quantità di calore scambiata tra due corpi producendo una diminuzione della differenza di temperatura fino ad arrivare all'equilibrio termico;
- $q_{lat} = h_e g_v$ è il flusso di calore latente ed è direttamente proporzionale al flusso di umidità, che avviene per diffusione;

La formula estesa, quindi, diventa:

$$[c_m\rho + c_w w(\varphi)] \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left[-\lambda(w) \frac{\partial T}{\partial x} + h_e g_v \right] \quad (2)$$

- λ è la conduttività termica del materiale che dipende dal contenuto d'umidità;
- h_e rappresenta l'entalpia di vaporizzazione, caratteristica intrinseca del materiale, definita come quantità di energia necessaria per vaporizzare l'unità di massa di un liquido saturo ad una data temperatura e pressione e decresce all'aumentare della temperatura o della pressione fino a ridursi a zero nel punto critico [3];
- T sono i valori della temperatura, ricavati dal database di WUFI;

Il software PAN si riferisce invece alla norma UNI EN ISO 13788 ed applica un calcolo stazionario. Il metodo di calcolo si basa sulla risoluzione analitica dell'equazione del calore, con condizioni al contorno periodiche. Per uno strato omogeneo con conduttività λ , densità ρ e calore specifico c si ottiene:

$$\rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = - \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} \quad (3)$$

- ρc rappresenta la capacità termica volumetrica del materiale, senza tener conto della capacità termica volumetrica dell'acqua;

- $q(x,t) = -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}$ è il flusso di calore, che non tiene conto dell'apporto del calore latente;
- T sono i valori di temperatura ricavati dalla norma UNI 10349, dalla versione del 2016 o da quella del 1994;

Poiché λ , ρ e c sono dei valori costanti, in un calcolo stazionario, la formula estesa risulta:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (4)$$

Dall'equazione (4) si nota che il trasferimento di calore è proporzionale alla diffusività, definita come:

- $a = \frac{\lambda}{\rho c}$, che aumenta all'aumentare della conduttività e al diminuire di calore specifico e densità del materiale. Rifacendosi a un calcolo stazionario rispetto ad uno dinamico non vengono considerati:
- i passaggi termici dovuti al passaggio di fase (q_{lat});
- la variazione di λ rispetto a temperatura e umidità;
- il contributo della capacità volumetrica dell'acqua in dipendenza del contenuto di umidità relativa;

1.2 Legge del trasporto di umidità

Secondo la UNI EN 15026 l'aumento del contenuto di umidità per unità di volume è determinato dal flusso netto di umidità. Il flusso di umidità eguaglia la somma del flusso di vapore per diffusione e del flusso di acqua per trasporto capillare:

$$\frac{\partial w(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial(g_v + g_w)}{\partial x} \quad (5)$$

- w è il contenuto d'umidità in massa su unità di volume, che dipende dall'umidità relativa ed è rappresentato graficamente tramite una funzione isoterma di assorbimento tipica del materiale;

- $g_v = \frac{1}{\mu(\varphi)} \cdot \delta_0 \frac{\partial P_v}{\partial x}$ è il flusso di vapore che si propaga per diffusione;

- $g_w = K(P_{suc}) \frac{\partial P_{suc}}{\partial x}$ è il flusso di acqua che s'instaura per effetto del trasporto capillare, strettamente legato alla porosità del materiale;

La formula estesa, quindi, diventa:

$$\frac{\partial w(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu(\varphi)} \cdot \delta_0 \frac{\partial P_v}{\partial x} + K(P_{suc}) \cdot \frac{\partial P_{suc}}{\partial x} \right] \quad (6)$$

- μ è il fattore di resistenza igroscopica o fattore di resistenza al vapore, che è in funzione dell'umidità relativa;

- δ_0 rappresenta la permeabilità al vapore acqueo dell'aria riferita alla pressione parziale del vapore, che dipende dalla temperatura e dalla pressione atmosferica;

- P_v è la pressione di vapore;

- $K(P_{suc}) = -D_w(w) \frac{\partial w}{\partial P_{suc}}$ è un coefficiente di trasporto che rappresenta la conducibilità del liquido. D_w è a sua volta un coefficiente di trasporto, che dipende fortemente dal contenuto di umidità. Non è una proprietà intrinseca del materiale, ma dipende anche dalle condizioni a contorno;

- P_{suc} è la pressione di succhiamento che dipende dall'umidità relativa dell'aria che lo circonda;

Il software PAN, sempre in accordo con la UNI EN ISO 13788, calcola la massa di vapore per unità di superficie, accumulata in corrispondenza dell'interfaccia, come una quantità influenzata unicamente dalla diffusione del vapore acqueo, senza tener conto del contributo dovuto al trasporto capillare.

$$\frac{\partial M_a(x, t)}{\partial t} = g_v \quad (7)$$

- M_a è la massa di vapore per unità di superficie accumulata in corrispondenza dell'interfaccia;

- $g_v = \delta_0 \frac{\Delta P}{s_d}$ è il flusso di vapore che si propaga per diffusione;

- $s_d = \mu d$ rappresenta lo spessore equivalente di aria per la diffusione del vapore acqueo;

La formula estesa, quindi, risulta:

$$\frac{\partial M_a(x, t)}{\partial t} = + \frac{\delta_0}{\mu} \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} \quad (8)$$

L'impiego di proprietà costanti dei materiali costituisce un'ulteriore approssimazione. Il fattore di resistenza al vapore, ad esempio, non è funzione dell'u-

midità relativa, ma è un valore costante per ogni materiale. Il valore δ_0 dovrebbe dipendere da temperatura e pressione atmosferica, ma per normativa sono trascurati questi effetti ed imposto come valore costante pari a $2 \times 10^{-10} \text{ Kg}/(\text{m s Pa})$.

Secondo la norma UNI EN ISO 13788, per calcolare la quantità di acqua evaporata e condensata, si effettua l'analisi a partire dal primo mese in cui è prevista condensazione. La quantità di acqua condensata accumulata alla fine dei mesi in cui è avvenuta condensazione viene poi confrontata con quella evaporata durante il resto dell'anno. Quando la quantità di acqua evaporata è pari a quella accumulata si avrà un flusso pari a zero. Rifacendosi a un calcolo stazionario rispetto ad uno dinamico non vengono considerati:

- l'assorbimento capillare e il trasporto di acqua liquida;
- il fattore di resistenza al vapore costante;
- il valore δ_0 calcolato in dipendenza da temperatura e pressione atmosferica;

Il calcolo stazionario, inoltre, considera il trasporto di umidità solamente in relazione alla presenza di condensa interstiziale, non considerando le condizioni igrotermiche all'interno della stratigrafia, cioè i materiali sono considerati asciutti fino alla formazione di condensa.

2. Fenomeni trascurati nel calcolo stazionario

Per comprendere l'influenza dei fenomeni trascurati (calore latente e trasporto capillare) nel calcolo stazionario è possibile fare un'analisi. Si considera una stratigrafia tratta dal documento "Isolamento termico dall'interno senza barriera al vapore" [1]. Nell'intervento descritto, si è eseguita una coibentazione interna delle pareti con pannelli minerali in idrati di silicato di calcio (Multipor) dello spessore di 12 cm. Il pacchetto stratigrafico è composto dalla muratura esistente, in blocchi di pietra arenaria,

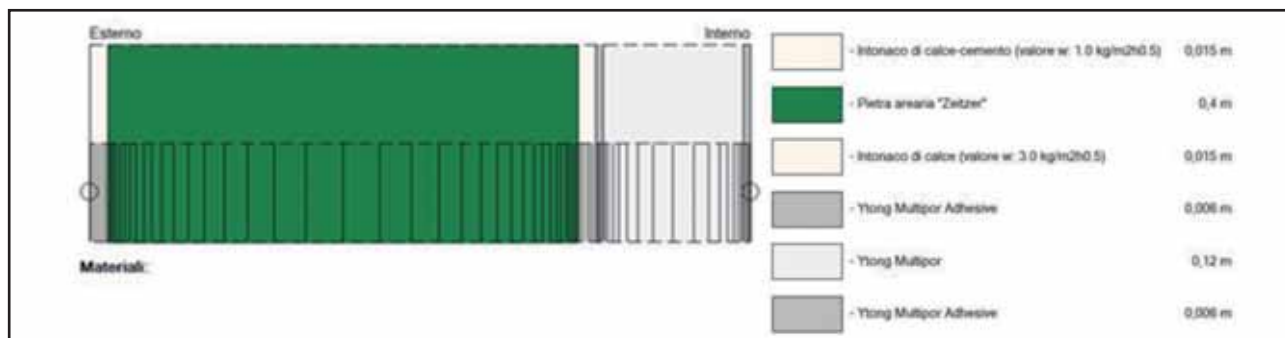


Fig 1 - Stratigrafia e caratteristiche dei materiali

intonacata verso l'esterno con malta di calce e cemento e verso l'interno con intonaco di calce. L'intervento prevede l'aggiunta sul lato interno di un pannello minerale in idrati di silicati di calcio (Multipor) e di strati d'incollaggio e rasatura dello stesso (Ytong Multipor Adhesive)(Fig. 1).

2.1 Contributo del calore latente

Il contributo fornito dal calore latente si trova nella legge di conservazione del calore (1). Si presenta come un flusso di calore:

$$q_{lat} = h_e g_v$$

L'apporto dovuto al calore latente è direttamente proporzionale all'entalpia di vaporizzazione h_e , proprietà intrinseca di ogni materiale. Il flusso dovuto al calore latente è inoltre direttamente proporzionale al flusso di vapore per diffusione g_v . Il contributo di q_{lat} influisce sulla variazione di temperatura negli strati, poiché avviene a temperatura costante durante una trasformazione di fase. Al fine di analizzarne gli effetti si è considerata una stratigrafia in cui si verificasse condensa: partendo dalla stratigrafia precedentemente descritta si è aggiunta una barriera al vapore con μ pari a 1500000, posta in modo erroneo nella parte fredda dell'isolante, in modo che si generi condensa all'interno della parete. Si conducono due prove in regime dinamico con l'utilizzo di WUFI cambiando solamente l'impostazione del metodo di calcolo per quanto riguarda il flusso di calore. Si considera il trasporto di umidità dovuto solamente all'apporto dato dal flusso di vapore per diffusione e non si considera il fenomeno del trasporto capillare. Questo per garantire un accumulo maggiore di umidità nello strato d'interesse

e poter visualizzare meglio gli effetti del calore latente:

$$\frac{\partial w(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu(\varphi)} \cdot \delta_0 \frac{\partial P_v}{\partial x} + K(P_{suc}) \cdot \frac{\partial P_{suc}}{\partial x} \right]$$

- Caso 1: Si considera il contributo del calore latente

$$[c_m \rho + c_w w(\varphi)] \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left[-\lambda(w) \frac{\partial T}{\partial x} + h_e g_v \right]$$

- Caso 2: Si trascura il contributo del calore latente

$$[c_m \rho + c_w w(\varphi)] \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left[-\lambda(w) \frac{\partial T}{\partial x} + h_e g_v \right]$$

Partendo da queste impostazioni di calcolo, si confrontano le temperature interne allo strato nel quale si presenta condensa: nell'isolante Ytong-Multipor. Si ottiene che nei mesi invernali, quindi con un cambio di stato da gas a liquido (condensazione), l'apporto del flusso di calore latente fa innalzare la temperatura. Viceversa nei mesi estivi, quelli nei quali si verifica un passaggio di stato da liquido a gas (evaporazione), si ottiene un abbassamento di temperatura (Fig. 2).

L'influenza del calore latente sulla temperatura è però mediamente il 7‰, per quanto concerne lo strato più critico di questa stratigrafia, quindi certamente trascurabile.

2.2 Contributo del trasporto capillare

Il contributo fornito dal trasporto capillare è espresso nella legge del trasporto d'umidità (6) e vale:

$$g_w = K(P_{suc}) \frac{\partial P_{suc}}{\partial x}$$

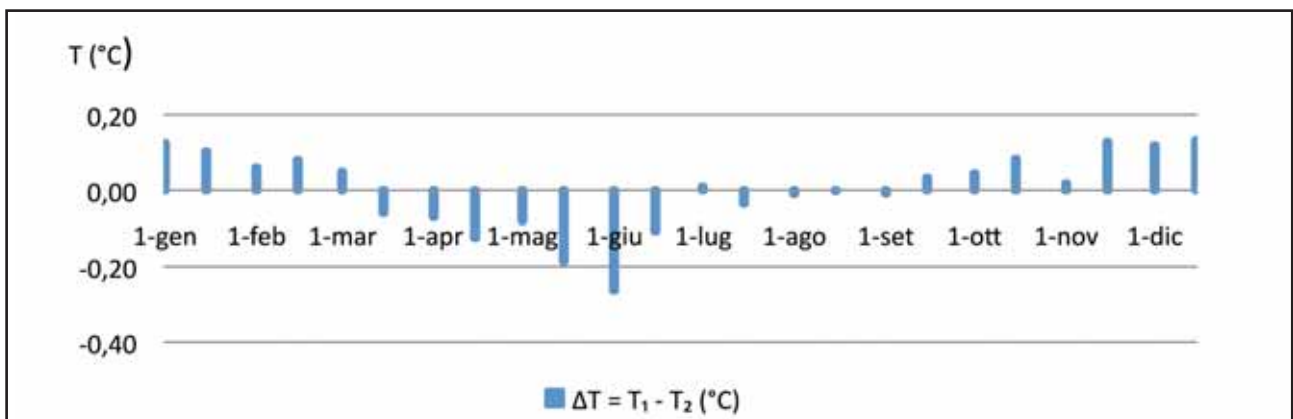


Fig. 2 - Grafico rappresentante la differenza di temperatura tra il caso 1 e il caso 2

Questo fenomeno influisce sul calcolo del contenuto d'umidità nella stratigrafia, che a sua volta influisce sulle caratteristiche dei materiali. Per capire quanto incida il trasporto capillare, si sono eseguite due prove, impostando metodi di calcolo differenti, partendo dalla stessa stratigrafia. Il flusso di calore è considerato in tutte le sue componenti ($q_{sens} + q_{lat}$), mentre il flusso di umidità viene analizzato in due casi differenti:

-Caso 1: Si considera il contributo del trasporto capillare

$$\frac{\partial w(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu(\varphi)} \cdot \delta_0 \frac{\partial P_v}{\partial x} + K(P_{suc}) \cdot \frac{\partial P_{suc}}{\partial x} \right]$$

-Caso 2: Si trascura il contributo del trasporto capillare

$$\frac{\partial w(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu(\varphi)} \cdot \delta_0 \frac{\partial P_v}{\partial x} + K(P_{suc}) \cdot \frac{\partial P_{suc}}{\partial x} \right]$$

Analizzando le differenze di umidità relativa e contenuto di umidità all'interno dello strato più critico, cioè quello dell'intonaco Ytong-Multipor Adhesive, si nota che, nei mesi estivi, si riscontra una maggiore corrispondenza dei risultati tra i due casi, mentre, nei mesi invernali, si hanno valori più elevati nel secondo caso, cioè trascurando l'apporto del trasporto capillare. Questi risultati sono ragionevoli perché questo fenomeno fa sì che il contenuto d'umidità non permanga nel singolo strato, ma sia ridistribuito in tutta la stratigrafia. Si nota un incremento di umidità relativa nei mesi invernali pari mediamente al 5% (Fig. 3) e un incremento del contenuto d'umidità, sempre nei mesi invernali, pari al 18% circa (Fig. 4), per quanto concerne lo strato più critico di questa stratigrafia.

3. Conclusioni

Le differenze tra il calcolo stazionario e il calcolo dinamico sono riportate sinteticamente in Tabella 1 e si possono identificare i principali motivi ne:

- le caratteristiche dei materiali considerate;

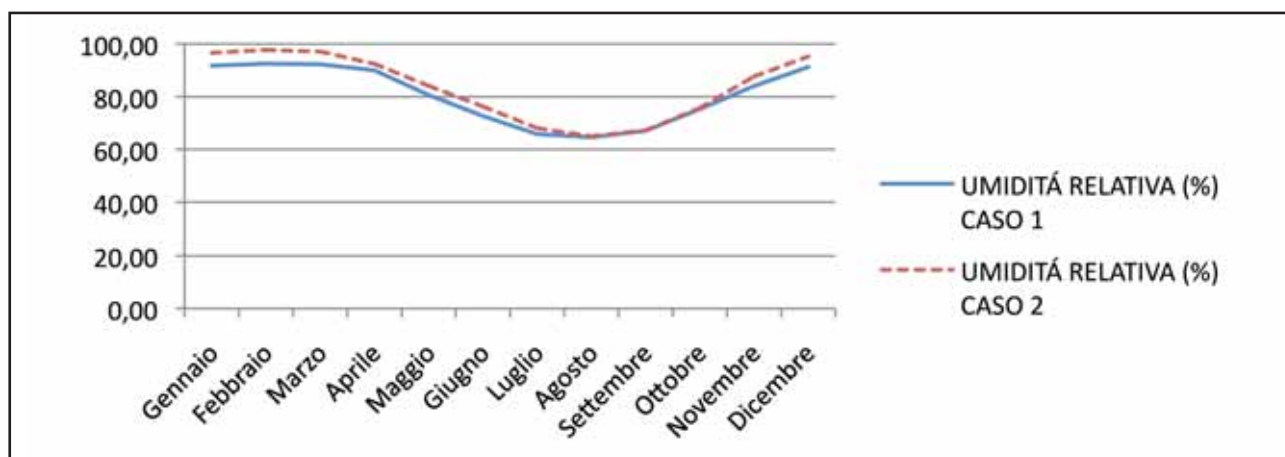


Fig 3 - Grafico rappresentante la differenza di umidità relativa tra il caso 1 e il caso 2

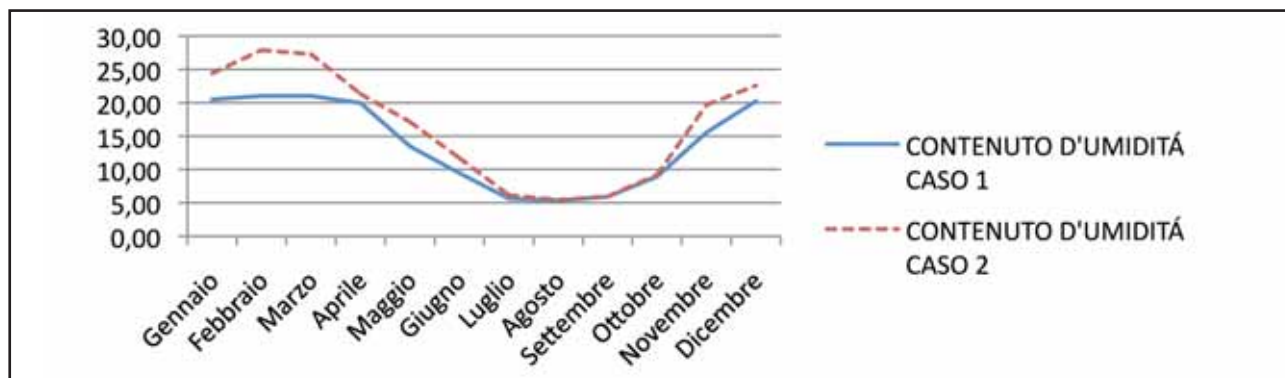


Fig 4 - Grafico rappresentante la differenza di contenuto d'umidità tra il caso 1 e il caso 2

- le condizioni climatiche utilizzate;
- gli algoritmi di calcolo adottati;

I materiali utilizzati per il calcolo stazionario sono caratterizzati da valori costanti, mentre il calcolo dinamico necessita di specificazioni aggiuntive, descritte tramite funzioni igrotermiche.

Ciò è evidentemente più realistico, in quanto al variare di temperatura, umidità relativa e contenuto d'umidità all'interno del materiale, si può ottenere una resa diversa di un materiale. Il calcolo dinamico considera condizioni climatiche esterne variabili a differenza del calcolo stazionario che utilizza, invece, delle medie che possono essere di tipo mensile o orario.

Il calcolo stazionario non tiene conto di variabili quali: la radiazione delle onde corte e lunghe, la velocità del vento media, la somma della pioggia verticale e l'indice di nuvolosità media. Le reali condizioni al contorno non sono costanti nell'arco né di un mese né di un'ora, dunque il calcolo dinamico è un modello più rappresentativo della realtà.

Le differenze sopracitate influenzano gli algoritmi di calcolo: la legge di conservazione del calore e la legge del trasporto di umidità. Entrambe le formule presentano da una parte la capacità dei materiali di assorbire calore e umidità e dall'altra la capacità di trasporto

	Calcolo stazionario	Calcolo dinamico
Dipendenza conduttività termica λ dalla temperatura e dal contenuto di umidità	X	V
Dipendenza del fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ dall'umidità relativa	X	V
Dipendenza del coefficiente di trasporto acqua liquida D_w , di succhiamento e distribuzione, dal contenuto d'umidità	-	V
Dipendenza del contenuto d'umidità w dall'umidità relativa	X	V
Dipendenza della permeabilità al vapore acqueo dell'aria δ_0 da temperatura e pressione atmosferica	X	V
Porosità	-	V
Scambio di calore latente q_{lat}	-	V
Risalita capillare e trasporto acqua liquida nei materiali g_w	-	V
Condizioni climatiche esterne variabili	X	V
Dati relativi a: radiazione onde corte e lunghe, velocità del vento media, somma della pioggia verticale, indice di nuvolosità media	-	V
Movimenti dell'aria attraverso i materiali per convezione	-	-
Dove X significa "non tiene conto di", V "tiene conto di" e - "non presente nell'algoritmo"		

Tabella 1 - Variabili considerate dal calcolo dinamico e dal calcolo statico

Simbolo	Quantità	Misura
c_m	Calore specifico del materiale secco	J/kgK
c_w	Calore specifico dell'acqua liquida	J/kgK
D_w	Coefficiente di diffusione del vapore	m^2/s
g	Flusso di umidità	Kg/m^2s
g_v	Flusso di vapore per diffusione	Kg/m^2s
g_w	Flusso di acqua per trasporto capillare	Kg/m^2s
h_e	Entalpia di vaporizzazione	J/kg
K	Coefficiente di trasporto	s/m
M_a	Massa di vapore per unità di superficie accumulata in corrispondenza di un'interfaccia	Kg/m^2
P_{suc}	Pressione di succhiamento	Pa
P_v	Pressione di vapore	Pa
ρ	Densità del materiale	Kg/m^3
q	Flusso di calore	W/m^2
q_{sens}	Flusso di calore sensibile	W/m^2
q_{lat}	Flusso di calore latente	W/m^2
s_d	Spessore di aria equivalente	m
T	Temperatura	K
t	Tempo	s
δ_0	Permeabilità al vapore acqueo dell'aria, riferita alla pressione parziale del vapore	$Kg/msPa$
λ	Conduttività termica	W/mK
φ	Umidità relativa	$\%$
μ	Fattore di resistenza al vapore o fattore di resistenza igroscopica	$(-)$
w	Contenuto di umidità in massa per unità di volume	Kg/m^3

degli stessi. Sempre la Tabella 1 mostra come gli algoritmi del calcolo dinamico tengono conto di fenomeni aggiuntivi: lo scambio di calore latente, per quanto riguarda il flusso di calore, e il trasporto capillare, per quanto riguarda il trasporto di umidità.

Analizzando più nel dettaglio i fenomeni aggiuntivi, ossia il trasporto capillare e il calore latente, si riscontra che, per quanto concerne la stratigrafia studiata, il contributo del trasporto capillare risulta avere una maggiore incidenza nei valori di umidità relativa e contenuto di umidità.

Per effetto del trasporto capillare, infatti, i va-

lori di umidità relativa all'interno dei materiali si riducono, favorendo un allontanamento dai valori di rischio di condensa interstiziale.

Per quanto riguarda il contenuto d'umidità invece non è possibile effettuare un confronto tra i due metodi di calcolo.

Esiste, infatti, una sostanziale differenza tra gli algoritmi che, per quanto riguarda la legge del trasporto di umidità, si evidenzia nella capacità di immagazzinare acqua.

Il calcolo stazionario considera il trasporto di umidità solamente in relazione alla presenza di condensa interstiziale, non considerando le condizioni igrotermiche all'interno della stratigrafia, cioè fino alla formazione di condensa i


materiali sono considerati asciutti.

Il calcolo dinamico, invece, considera la capacità di assorbimento e rilascio di umidità dei materiali in funzione dell'umidità relativa, a prescindere che si verifichino o meno le condizioni per la formazioni di condensa.

A seguito del confronto tra il metodo stazionario e quello dinamico, effettuato tramite l'utilizzo dei programmi PAN e WUFI, si evince in primo luogo che il calcolo stazionario è maggiormente cautelativo rispetto ad una simulazione dinamica.

Questo comporta che se il pacchetto stratigrafico è verificato con un calcolo stazionario, questo può considerarsi sufficiente al fine dell'analisi. Viceversa, se una struttura non fosse verificata col modello stazionario, il ricorso a simulazioni dinamiche meglio coglie l'effettivo comportamento della stratigrafia .

Il calcolo stazionario, secondo la UNI EN ISO 13788, è una buona approssimazione nel caso in cui si abbiano strutture leggere, poco permeabili all'aria, che non contengano materiali che possono accumulare grandi quantità d'acqua. Essa non è adattata, invece, per la valutazione di componenti edilizie attraversate da flussi d'aria o caratterizzati da moti interni, né nel caso in cui la struttura assorba acqua piovana. Le principali semplificazione del metodo stazionario che determinano una fonte d'errore sono descritte nel capitolo 6.3 della norma UNI EN ISO 13788.

Anche il calcolo dinamico, effettuato con WUFI, pur considerando fenomeni aggiuntivi, non tiene conto dei moti d'aria per convezione all'interno della stratigrafia, i quali influiscono in maniera incisiva sul flusso di vapore e accumulo di umidità. Con un calcolo dinamico, inoltre, raramente si raggiungono livelli di umidità relativa pari al 100%, facendo quindi intendere un'assenza di condensa interstiziale. Per un'interpretazione corretta dei risultati è necessaria, pertanto, una conoscenza più approfondita dei fenomeni in atto, in modo da poter comprendere dai valori ottenuti se una condizione deve essere considerata critica. 

Bibliografia

- [1] ANIT (settembre 2013), Isolamento termico dall'interno senza barriera al vapore, versione 1, ANIT, Milano, IT
- [2] ANIT (3 maggio 2016), PAN 7 Manuale del software, ANIT, Milano, IT
- [3] Çengel, Y. (1998), "Termodinamica e trasmissione del calore", McGraw-Hill libri Italia SRL, Milano, IT
- [4] UNI EN ISO 13788 (giugno 2013) Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per l'edilizia, Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale, Metodi di calcolo, Milano, IT
- [5] UNI EN 15026 (luglio 2008) Prestazione termoigrometrica dei componenti e degli elementi di edificio, valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica, Milano, IT
- [6] Zirkelbach, D., Schmidt, Th., Kehrer, M. and Künzel, H.M., WUFI® Pro Manual, disponibile al link: <https://web.fe.up.pt/~wufi/manual.pdf> (accesso del 17 Novembre 2016)

**Alessandra Mesa,*

Laureanda in Ingegneria Edile Architettura presso il DICATAM, Università di Brescia.

Margherita Mor,

Laureanda in Ingegneria Edile Architettura presso il DICATAM, Università di Brescia.

Alberto Arengi,

Professore Associato di Architettura Tecnica presso il DICATAM, Università di Brescia.

neo-EÚBIOS

Periodico trimestrale
anno XVII - n. 58
Dicembre 2016

Direttore Responsabile
Susanna Mammi

Redazione
TEP s.r.l.
Via Savona 1/B
20144 Milano
tel 02/89415126

Grafica e impaginazione
Claudio Grazioli

Distribuzione
in abbonamento postale

Associato
A.N.E.S. - *Associazione Nazionale*
Editoriale Periodica Specializzata

Stampa
INGRAPH srl - via Bologna
104/106 - 20038 Seregno (MB)

Registrazione Tribunale di Milano
n. 524 del 24/7/1999

Tutti i diritti sono riservati.

Nessuna sezione della rivista
può essere riprodotta in
qualsiasi forma senza
l'autorizzazione dell'Editore.