



# Validazione di un modello di calcolo delle perdite di carico con software BIM

*Effettuata su un caso di studio costituito da un edificio per uffici e laboratori, la validazione ha previsto un primo confronto dei risultati ottenuti con un software di calcolo tradizionale e un software BIM. Questi ultimi sono stati a loro volta confrontati con quelli delle misure effettuate in campo in fase di commissioning dell'edificio*

*G. Bo, F. Cristofoli, M. Masoero\**

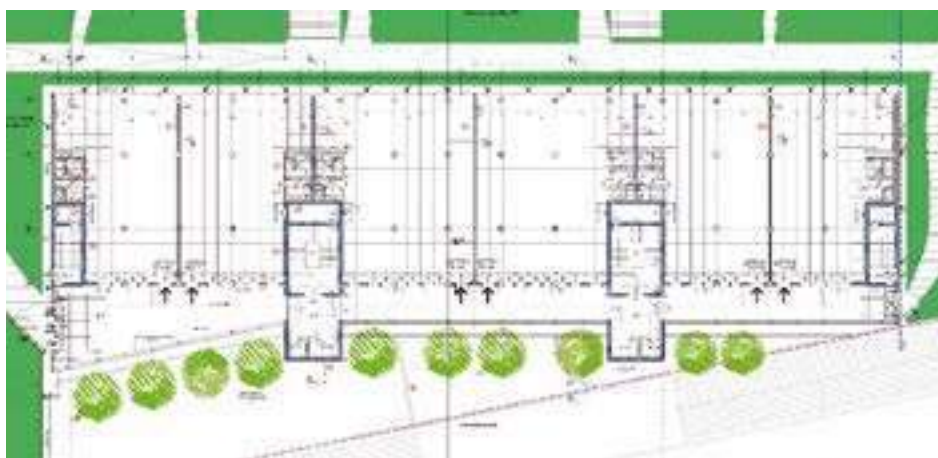
**L**E METODOLOGIE BIM (Building Information Modeling) sono quanto di più moderno e all'avanguardia esista nel campo della progettazione e il loro utilizzo dovrebbe, in teoria, limitare costi e imprevisti a vantaggio da una parte del processo costruttivo, dall'altra della tutela del cliente finale.

Perché queste metodologie siano correttamente impostate e implementate, è richiesto al progettista uno sforzo maggiore rispetto a quello previsto per le metodologie classiche: non solo la

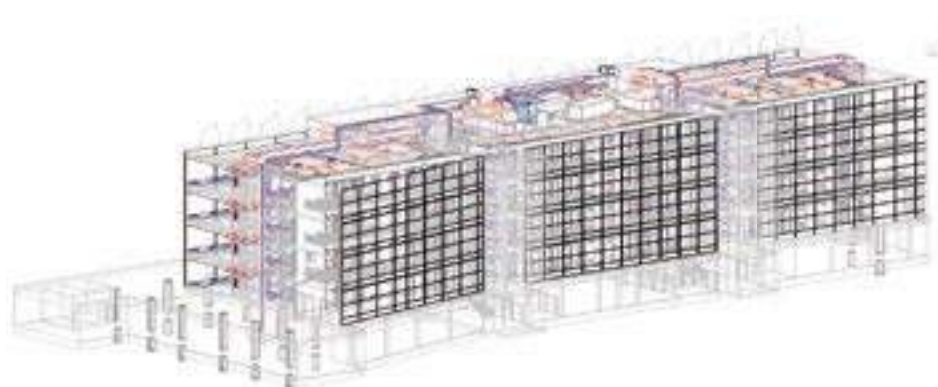
creazione e la revisione di tipologici progettuali caratteristici di ogni società di ingegneria, ma anche la necessità di effettuare operazioni progettuali non richieste nel passato: si pensi alla redazione di documenti come il piano di gestione informativa, la generazione del modello principale e dei sottomodelli e la loro organizzazione e i frequenti controlli di interferenze. In altre parole, la quantità di attività che una società di ingegneria si trova a dover compiere per redigere un progetto con

metodi BIM è sensibilmente maggiore rispetto al passato, a fronte di una realtà di mercato che spesso non riconosce né le risorse né il tempo impiegato per effettuarle.

Al fine di risolvere almeno parzialmente tale situazione, non rimane che cercare di ottimizzare le risorse che strumenti potenti come il BIM rendono disponibili: non si deve



**Figura 1** – Pianta piano tipo dell'edificio



**Figura 2** – Modello BIM dell'edificio



**Figura 3** – Facciata nord-est dell'edificio



### **VALIDATION OF A PRESSURE LOSS CALCULATION MODEL WITH BIM SOFTWARE**

Building Information Modeling (BIM) methodologies made a big impact on the traditional way of designing. To take full advantage of this change, designers need to go beyond the pure modeling tool and set up a work-flow that could allow the designer saving time, otherwise spent to perform complex calculations. In this article, the possibility of using commercial BIM software to properly perform pressure loss calculations in HVAC systems, is assessed. In order to achieve this verification, software calculation will be compared with hand-performed calculation and on-field measurements.

*Keywords:* **BIM, HVAC systems, Pressure loss calculation**

utilizzare la modellazione come mera “disegnazione 3-D”, ma bisogna sfruttarla anche per effettuare calcoli complessi e tipici della progettazione impiantistica.

Di seguito sono presentati e discussi i risultati della validazione del metodo di calcolo delle perdite di carico di reti idroniche e aeruliche di un software BIM commerciale. Tale validazione, effettuata su un caso di studio costituito da un edificio per uffici e laboratori, è stata svolta in due fasi: in prima battuta sono stati confrontati i risultati ottenuti utilizzando un software BIM e un software di calcolo tradizionale; in secondo luogo i risultati del software BIM sono stati confrontati con quelli di misure effettuate in campo in fase di commissioning dell'edificio.

### **Il caso di studio**

Situato a Bergamo all'interno del parco scientifico-tecnologico Kilometro Rosso e completato nel 2018, il Pixel Building è un fabbricato destinato a uffici e laboratori, caratterizzato da soluzioni compositive, costruttive e tecnologiche all'avanguardia, in grado di restituire prestazioni energetiche di livello NZEB. Le caratteristiche salienti di tale edificio, di cui nelle Figure 1 e 2 sono riportati rispettivamente la pianta del piano tipo e il modello BIM generale sono le seguenti:

- dimensioni in pianta: 90 m per 24 m;
- orientamento asse principale: 40° nord-ovest;
- fattore di forma S/V: 0,234;
- autorimessa interrata;
- 4 piani fuori terra per spazi di lavoro, articolati in aree di diversa taglia aggregabili in modo flessibile.

Sono presenti anche una zona ristoro e relax di oltre 1.000 m<sup>2</sup>, ambienti comuni e aree verdi

**Figura 4** – Dettaglio dei frangisole



attrezzate per momenti di incontro e relazione. Le facciate principali sono quasi completamente trasparenti. La presenza di una serra solare a tutta altezza, che occupa l'intera facciata orientata a ponente e che accoglie gli spazi distributivi, è fra gli elementi distintivi del progetto.

L'involucro edilizio è caratterizzato da due grandi facciate vetrate; quella a nord-est, nelle Figure 3 e 4, realizzata con sistema a cellule (struttura in alluminio a taglio termico e vetrocamere ad ampia specchiatura,  $U_w = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $FS = 49\%$ ), delimita gli ambienti di lavoro e presenta elevate prestazioni termoisolanti. La superficie trasparente è schermata da frangisole in profili metallici disposti perpendicolarmente rispetto al prospetto.

La facciata esposta a sud-ovest, che delimita la serra e che è mostrata nelle Figure 5 e 6, è realizzata con vetrate singole a basse prestazioni termiche, ma presenta un fattore solare pari a 47%, che risulta elevato se si tiene conto della richiesta architettonica di avere vetri il più possibile chiari, con forte presenza di serigrafie. La parete che separa la serra dagli uffici è solo parzialmente trasparente e presenta elevate prestazioni termoisolanti.

Gli impianti di climatizzazione a servizio dell'edificio sono del tipo a ventilconvettori a quattro tubi più aria primaria, con le principali centrali tecniche (centrale termofrigorifera, pompaggi e UTA) posizionate in copertura. Quattro cavedi contengono le dorsali primarie verticali, mentre ai piani le distribuzioni transitano nel pavimento galleggiante (tubazioni e condotte di mandata aria) e nel controsoffitto (tubazioni e condotte di ripresa aria). Nelle Figure 7 e 8 sono visibili UTA e cavedi tecnici.



**Figura 5** – Facciata sud-ovest dell'edificio



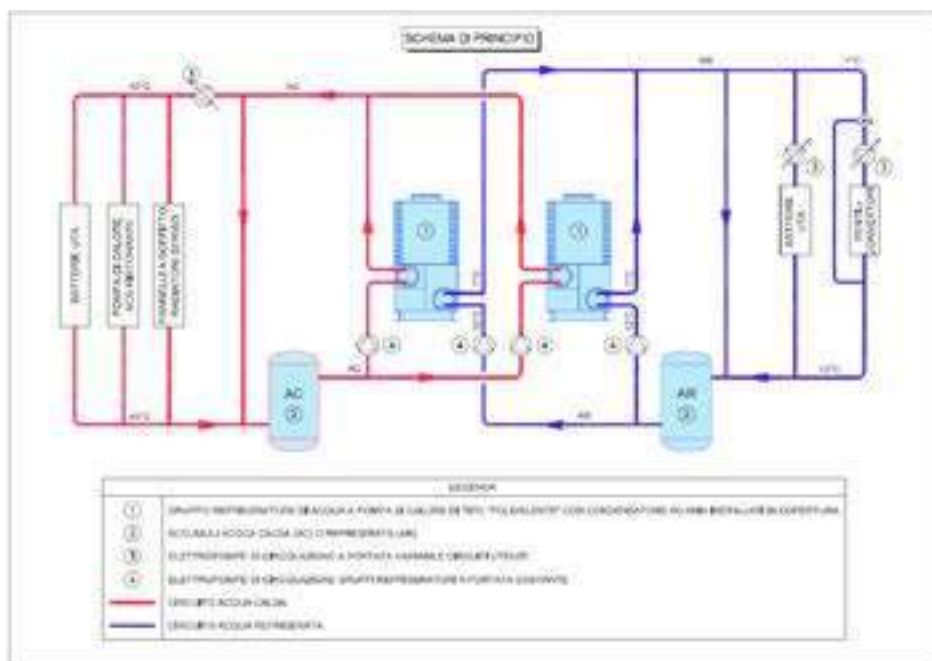
**Figura 6** – Serra



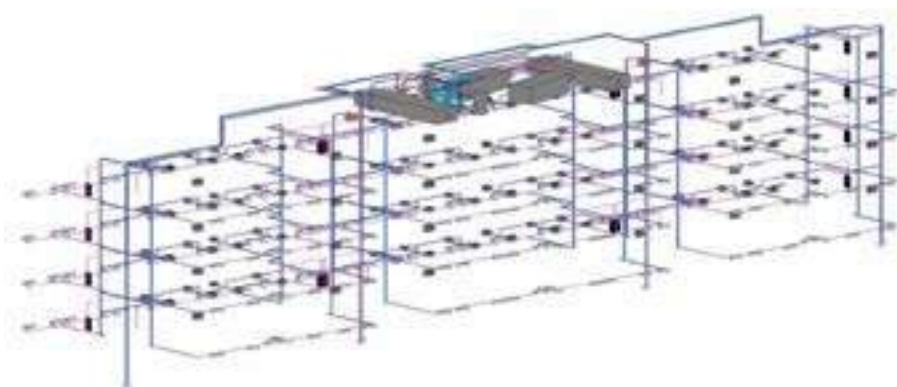
**Figura 7** – Unità di trattamento aria installata



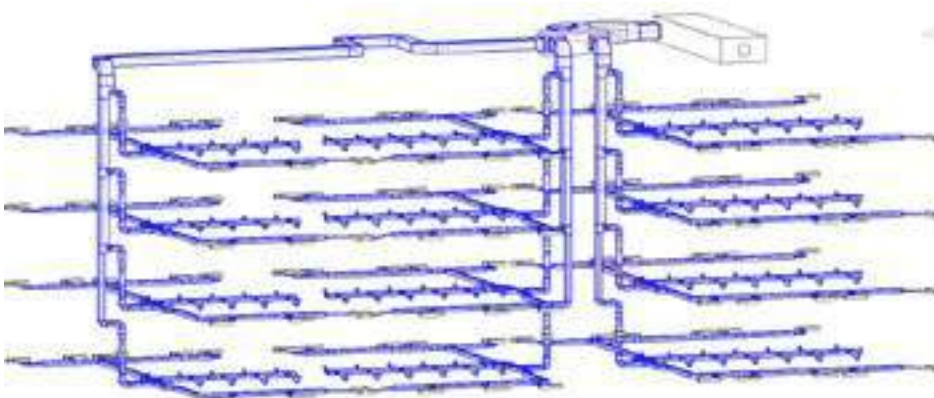
**Figura 8** – Cavedi tecnici



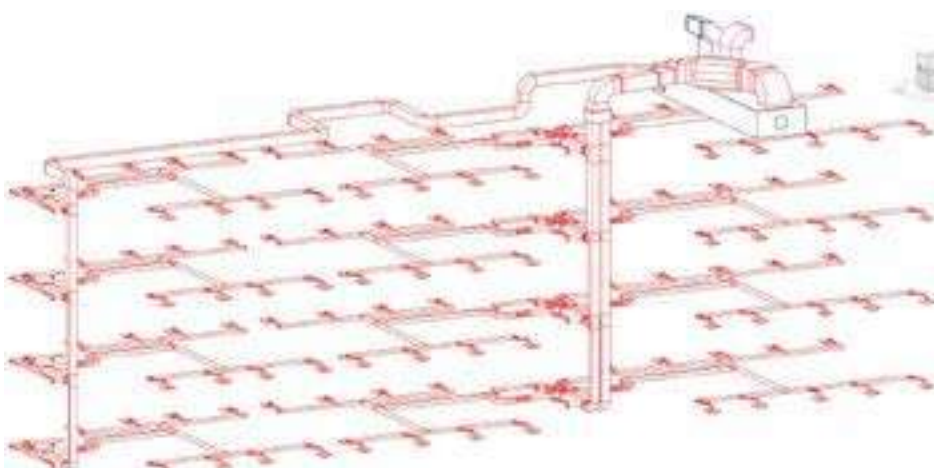
**Figura 9** – Schema di principio della centrale termofrigerata



**Figura 10** – Estratto del modello BIM delle tubazioni dell'impianto di climatizzazione



**Figura 11** – Estratto del modello BIM delle condotte di mandata aria



**Figura 12** – Estratto del modello BIM delle condotte di ripresa aria

## I modelli BIM oggetto di studio

Come anticipato, la validazione del modello di calcolo è stata effettuata su due diversi circuiti: quello idronico per climatizzazione e quello aerulico.

### Circuiti idronici

Il circuito idronico dell'edificio modellato è del tipo a 4 tubi, in quanto anche durante la stagione invernale l'edificio ha contemporaneo fabbisogno di energia termica e frigorifera. Durante la stagione estiva, come ovvio, l'edificio ha necessità solo ed esclusivamente di energia frigorifera.

Il cuore dell'impianto di climatizzazione è costituito da 2 gruppi refrigeratori di acqua a pompa di calore di tipo polivalente con condensazione ad aria. In Figura 9 è riportato lo schema funzionale semplificato.

I terminali in ambiente dell'impianto idronico sono costituiti principalmente da due tipologie di ventilconvettori, che nella parte interna dell'edificio sono installati nel controsoffitto, mentre lungo le facciate sono sottopavimento. Ulteriori terminali sono costituiti dalle batterie di riscaldamento e di raffreddamento e deumidificazione delle unità di trattamento aria poste in copertura, dagli scaldasalviette nei servizi igienici e dalle batterie di post-riscaldamento da canale installate a ogni singolo piano all'interno dei cavedi.

In copertura sono presenti gli elementi ausiliari necessari al funzionamento del circuito idronico:

- elettropompe di circolazione in funzione dei fluidi e dei livelli termici da trattare: 2 per il circuito caldo e 2 per quello freddo;
- serbatoi di accumulo inerziali;
- componenti di sicurezza e collettori.

In Figura 10 è riportato un estratto del modello BIM delle tubazioni dell'impianto di climatizzazione.

### Circuiti aerulici

Gli impianti aerulici dell'edificio sono costituiti da quattro diversi circuiti: 2 di mandata, tra loro speculari, e 2 di ripresa, anch'essi speculari rispetto all'asse di simmetria dell'edificio, come mostrato nelle Figure 11 e 12. Questa simmetria rispecchia quella dell'edificio e delle due unità di trattamento aria che alimentano tali circuiti aerulici. I terminali dei circuiti di mandata (diffusori e ventilconvettori) sono installati nel pavimento galleggiante, mentre le griglie di ripresa sono posizionate a controsoffitto con tecnica di ventilazione UFAD.

L'impianto è progettato in modo che in ogni piano l'aria estratta dagli open space possa essere deviata nelle serre tramite delle serrande di regolazione. Le portate in gioco per ogni unità sono pari a:

- mandata: 22.000 m<sup>3</sup>/h
- ripresa: 17.000 m<sup>3</sup>/h

## Metodo di calcolo di tipo tradizionale utilizzato per validazione del modello BIM – circuito idronico

### Perdite distribuite

Nel modello di calcolo utilizzato per la validazione, le perdite di carico distribuite per metro lineare sono state calcolate mediante una formula empirica, che è una semplificazione dell'equazione completa di Colebrook:

$$\Delta P = 3,3 \cdot v^{0,13} \cdot \rho \cdot \frac{G^{1,87}}{D^{5,01}} \quad (1)$$

dove:

$\Delta P$  = perdita di carico unitaria, mm c.a./m;

$D$  = diametro interno del condotto, m;

$\rho$  = massa volumica del fluido, kg/m<sup>3</sup>;

$v$  = velocità media del fluido, m/s;

$G$  = portata volumetrica del fluido, l/h.

### Perdite concentrate

Nel metodo di calcolo utilizzato per la validazione, le perdite di carico concentrate sono state calcolate mediante la relazione:

$$\Delta P = \xi \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (3)$$

dove:

$\Delta P$  = perdita di carico localizzata, Pa;

$\xi$  = coefficiente caratteristico di ciascun tipo di accidentalità, adim.;

$\rho$  = massa volumica del fluido, kg/m<sup>3</sup>;

$w$  = velocità media del flusso, m/s.

Come ben noto, il parametro fondamentale per la determinazione delle perdite di carico è il coefficiente  $\xi$ , che risulta dipendere soprattutto dalla forma della resistenza localizzata e che è, con buona approssimazione, indipendente da altri fattori quali il peso specifico, la viscosità e la velocità del fluido (AiCARR, 2015). La letteratura tecnica fornisce una serie molto ampia di coefficienti, anche con valori differenti: nello studio qui presentato sono stati utilizzati quelli di derivazione ASHRAE (2013).

## Metodo di calcolo utilizzato dal software BIM – circuito idronico

### Perdite distribuite

Il software BIM risolve l'equazione generale delle perdite distribuite, in cui compare direttamente il fattore di attrito, che è legato al regime di moto e alla natura delle superfici interne della tubazione:

$$\Delta P = f \cdot \frac{1}{D} \cdot \rho \cdot \frac{W^2}{2} \quad (4)$$

dove:

$\Delta P$  = perdita di carico unitaria, Pa/m;

$f$  = fattore di attrito, adim.;

$D$  = diametro interno della tubazione, m;

$\rho$  = massa volumica del fluido, kg/m<sup>3</sup>;

$v$  = velocità media del fluido, m/s.

Tra le correlazioni proposte dal software per

**Tabella 1 – Valori delle perdite di carico del circuito idronico secondario, modellato con entrambe le metodologie**

Perdite [kPa]	Calcolo effettuato con metodo tradizionale	Calcolo effettuato con metodo BIM	Variazione
distribuite	19,76	19,71	-0,25%
concentrate	10,99	10,11	-8,01%
su terminali e apparecchiature	25,00	25,00	0,00%
<b>Totale</b>	<b>55,75</b>	<b>54,82</b>	<b>-1,67%</b>

calcolare il coefficiente di attrito è stata scelta l'equazione di Colebrook completa, ritenuta dagli Autori la più stabile nel range di velocità del fluido tipico degli impianti civili.

### Perdite concentrate

Il software utilizza la medesima formula descritta del caso del calcolo utilizzato per la validazione:

$$\Delta P = \xi \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (3)$$

Ai coefficienti  $\xi$  per ogni singolo componente o derivazione sono quindi coerentemente stati assegnati i medesimi valori utilizzati nel calcolo con metodo tradizionale.

### Risultati del calcolo – circuito idronico

L'analisi è stata condotta sulla perdita di carico del circuito più sfavorito, il secondario, modellato con entrambe le metodologie. I risultati sono riportati in Tabella 1, dalla quale risulta evidente che:

- le perdite dovute ai terminali, imposte direttamente dall'utente, sono le medesime in entrambi i modelli;
- l'incertezza maggiore è quella dovuta alle perdite concentrate, con uno scostamento dell'8%;
- la variazione sulle perdite distribuite è invece contenuta e non significativa.

Lo scostamento tra i due metodi di calcolo, pari a poco meno del 2%, non è quindi particolarmente significativo. Si fa comunque notare che lo scostamento può cambiare entità a seconda delle dimensioni del circuito e dell'incidenza delle perdite fisse da componente: si ritiene tuttavia che non vi siano particolari stravolgimenti.

## Metodo di calcolo di tipo tradizionale utilizzato per validazione del modello BIM – circuito aeraulico

### Perdite distribuite

Nel modello di calcolo utilizzato per la validazione, per determinare il fattore  $f$  è stata utilizzata una semplificazione dell'equazione di Colebrook, che non richiede una soluzione iterativa e trascura la dipendenza dalla rugosità del condotto e dalla viscosità dell'aria:

$$\Delta P = 0,018 \cdot \frac{v^{1,80}}{16 \cdot \left(\frac{d}{1000}\right)^{1,281}} \quad (5)$$

dove:

$\Delta P$  = perdita di carico unitaria, mm c.a./m;

$D$  = diametro interno del condotto, mm;

$\rho$  = massa volumica del fluido, kg/m<sup>3</sup>;

$v$  = velocità media del fluido, m/s.

### Perdite concentrate

Le perdite di carico concentrate sono state calcolate mediante la relazione:

$$\Delta P_{con} = \xi \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (6)$$

dove:

$\Delta P$  = perdita di carico localizzata, Pa;

$\xi$  = coefficiente caratteristico di ciascun tipo di accidentalità, adim.;

$\rho$  = massa volumica del fluido, kg/m<sup>3</sup>;

$w$  = velocità media del flusso, m/s.

Commenti a quelli fatti in merito ai circuiti idronici possono essere ripetuti per il calcolo delle perdite di carico dei circuiti aeraulici.

## Metodo di calcolo utilizzato dal software BIM – circuito aeraulico

### Perdite distribuite

Come per i circuiti idronici, il software BIM risolve l'equazione generale delle perdite distribuite, in cui compare direttamente il fattore di attrito:

$$\Delta P = f \cdot \frac{1}{D} \cdot \rho \cdot \frac{W^2}{2} \quad (7)$$

dove:

$\Delta P$  = perdita di carico unitaria, Pa/m;

$f$  = fattore di attrito, adim.;

$D$  = diametro interno della tubazione, m;

$\rho$  = massa volumica del fluido, kg/m<sup>3</sup>;

$v$  = velocità media del fluido, m/s.

Anche in questo caso, tra le correlazioni proposte dal software per calcolare il fattore di attrito è stata scelta l'equazione di Colebrook completa.

### Perdite concentrate

Il software utilizza la medesima

**Tabella 2** – Valori delle perdite di carico dei rami più sfavoriti del circuito aeraulico, modellato con entrambe le metodologie

Circuito di mandata dell'aria	Calcolo effettuato con metodo tradizionale	Calcolo effettuato con metodo BIM	Variazione
Perdite distribuite [Pa]	24,9	21,9	-12,05%
Perdite concentrate [Pa]	99,1	97,6	-1,51%
Perdite su componenti [Pa]	305	305	0,00%
<b>Totale [Pa]</b>	<b>429</b>	<b>424,5</b>	<b>-1,05%</b>
Circuito di ripresa dell'aria	Calcoli manuali	Revit	Variazione
Perdite distribuite [Pa]	34	37,8	-12,41%
Perdite concentrate [Pa]	72	78,2	8,7%
Perdite su componenti [Pa]	160	161	0,6%
<b>Totale [Pa]</b>	<b>266</b>	<b>277</b>	<b>-1,05%</b>

formula descritta nel caso del calcolo utilizzato per la validazione:

$$\Delta P = \xi \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (3)$$

Come nel caso del calcolo effettuato con il modello BIM, per coerenza sono stati assegnati i medesimi coefficienti utilizzati nel calcolo con metodo tradizionale.

#### Risultati del calcolo – circuito aeraulico

Le analisi di seguito riportate sono riferite ai rami più sfavoriti dei circuiti di mandata e di ripresa.

In Tabella 2 sono sintetizzati i risultati ottenuti con le due diverse metodologie ed è riportata la variazione

percentuale tra le 2 stime. Dall'esame della Tabella risulta evidente che:

- le perdite dovute ai terminali, imposte direttamente dall'utente, sono le medesime in entrambi i modelli, e rappresentano circa il 70% della complessiva perdita di carico del circuito. Questo fattore "appiattisce" molto lo scostamento fra i due calcoli;
- le variazioni relative alle perdite distribuite, seppure grandi in percentuale, sono di piccola entità in valore assoluto, comprese tra 2 e 4 Pa;
- permane, almeno nel circuito di ripresa, l'incertezza in merito alle perdite concentrate, vero punto critico dell'analisi; considerando esclusivamente le perdite di carico distribuite e concentrate (perdendo quindi l'effetto stabilizzante delle perdite di carico dovute a componenti) lo scostamento risulta pari mediamente a 3,7%.

**Tabella 3** – Valori della portata delle unità di trattamento aria

Circuito	Portata [m <sup>3</sup> /h]	
	di progetto	misurata
mandata dell'aria	22.000	12.500
ripresa dell'aria	17.000	12.000

**Tabella 4** – Valori della pressione dei circuiti utilizzati nel modello di calcolo BIM

Circuito	Pressione [Pa]		
	misurata in campo	calcolata con il metodo BIM	variazione
mandata dell'aria	270	260,5	-3,52%
ripresa dell'aria	290	265	-8,62%

#### BIBLIOGRAFIA

- ASHRAE. 2013. ASHRAE Fundamentals. Chapter 21 Duct Design. Atlanta: ASHRAE.
- AiCARR. 2015. Manuale di Idronica. Milano: AiCARR.
- Sauer H.J., Howell R.H., Coad W.J. 2005. Principles of heating, ventilating and air conditioning. Chapter 9 "Duct and pipe sizing". Atlanta: ASHRAE.

## Validazione del metodo di calcolo BIM mediante misure in campo

A ulteriore conferma dei risultati ottenuti in precedenza, il metodo di calcolo effettuato mediante software BIM è stato confrontato con le misure e le tarature effettuate in fase di commissioning dell'impianto effettivamente realizzato.

Si precisa che in fase di avviamento l'edificio era solo parzialmente occupato: d'accordo con la committenza, si è pertanto deciso di impostare il valore di portata delle unità di trattamento aria al minimo ammissibile per il corretto e continuo funzionamento dei ventilatori installati, pari a circa il 55-60% della portata nominale di progetto, come riportato in Tabella 3.

Il modello di calcolo BIM è stato quindi ricalcolato mantenendo inalterate le dimensioni geometriche del circuito, modificando esclusivamente la portata dei circuiti. I risultati sono in Tabella 4, dalla quale si rileva che in entrambi i casi il valore ottenuto dal calcolo risulta essere leggermente sotto-stimato rispetto alla reale necessità dell'impianto.

## Conclusioni

Il calcolo delle perdite di carico con software BIM è sicuramente una delle più interessanti opportunità che tali programmi possono fornire al progettista di impianti tecnici.

La procedura di calcolo, quando confrontata con altri metodi di calcolo e misurazioni, fornisce risultati incoraggianti, che possono però essere viziati dalla scelta e dalla imputazione manuale di due categorie di dati fondamentali: i coefficienti  $\xi$  che definiscono le perdite di carico concentrate, e le perdite di carico dei singoli componenti. Se per queste ultime è auspicabile che le librerie di componenti fornite dai costruttori possano col tempo risolvere tale problematica, rimane la necessità, allo stato attuale, non solo di imputare singolarmente tali coefficienti, ma anche e soprattutto di andare a selezionare quelli che più risultano essere corretti. A tal proposito, occorre sottolineare una criticità che affligge il calcolo delle perdite concentrate e che auspichiamo possa essere in futuro risolta, tenendo presente che la velocità di riferimento per il calcolo delle perdite di carico concentrate è costituita dalla velocità della sezione d'ingresso (Howell, 2005), mentre il software BIM oggetto di verifica utilizza la velocità alla sezione d'uscita, di fatto inficiando il risultato del calcolo.

Le esperienze pregresse di ogni progettista sono pertanto, com'è ovvio, fondamentali nel definire correttamente le scelte progettuali e di calcolo.

\* *Giorgio Bo*, Prodim – EP&S – Vice Presidente Vicario di AiCARR  
*Federico Cristofoli*, Prodim – EP&S, Torino  
*Marco Masoero*, Politecnico di Torino – Socio AiCARR