

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

Scuola di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale

Indirizzo Fisica Tecnica

Ciclo XXIII

**OTTIMIZZAZIONE DELL'UTILIZZO DELL'ENERGIA
TERMICA IN EDIFICI NUOVI ED ESISTENTI**

Direttore della Scuola: Prof. Paolo F. Bariani

Coordinatore di Indirizzo: Prof.ssa Luisa Rossetto

Supervisore: Ing. Michele De Carli

Correlatore: Dott. Sergio Marinetti

Dottorando: Pier Giorgio Cesaratto

SOMMARIO

In questo lavoro si affrontano in maniera organica alcune tematiche legate all'analisi energetica per edifici del settore residenziale e terziario. In particolare vengono considerati aspetti migliorativi riguardo la caratterizzazione dell'involucro esistente e la minimizzazione del fabbisogno netto di energia per la climatizzazione degli edifici, come pure l'ottimizzazione dell'intero sistema edificio-impianto con particolare attenzione al retrofit di impianti esistenti. Il primo aspetto, ovvero la caratterizzazione dell'involucro edilizio, è approfondito mediante l'analisi di misure di conduttanza termica in opera di elementi d'involucro e la determinazione della permeabilità all'aria dell'involucro stesso mediante prova di pressurizzazione. Riguardo la misura di conduttanza in opera si discutono un'analisi teorica e sperimentale della strumentazione di misura ed i metodi per l'analisi dei dati, con l'obiettivo di ampliare la conoscenza di quanto finora esistente circa la validità delle misure stesse; successivamente si espongono gli obiettivi e i metodi di una campagna di misure di conduttanza in opera, discutendone i risultati. Per quanto riguarda la determinazione della permeabilità all'aria degli edifici, sono approfonditi i metodi per lo svolgimento della prova e i principali modelli per correlare i risultati della prova stessa con l'indice di ricambio orario dell'edificio. Inoltre si discutono i risultati di una campagna di misure in opera mediante prova di pressurizzazione, oltre a un'analisi attraverso simulazioni numeriche per valutare la possibilità di utilizzare i modelli di infiltrazione per alcuni dei casi testati in opera. Per quanto riguarda l'analisi energetica degli edifici, si discute uno studio mediante simulazioni numeriche dei fabbisogni netti per la climatizzazione invernale ed estiva di edifici del settore residenziale e terziario, con l'obiettivo di valutare le soluzioni più vantaggiose dal punto di vista del risparmio energetico, garantendo comunque il soddisfacimento delle condizioni di comfort. Infine, per quanto riguarda l'ottimizzazione di sistemi edificio-impianto del settore residenziale, viene presentato uno studio attraverso simulazioni energetiche per la climatizzazione invernale, con particolare rilievo per le tipologie di sistemi di conversione dell'energia termica. In particolare, è stata analizzata la possibilità di effettuare il retrofit sia nel caso di impianti di edifici esistenti senza intervenire sull'involucro, che identificando il sistema energeticamente più efficiente per quanto riguarda edifici nuovi o sottoposti a coibentazione dell'involucro edilizio, e per alcuni casi è stato valutato il sistema per la conversione dell'energia termica più adatto nell'ipotesi di reti di teleriscaldamento.

SUMMARY

An in-deep study concerning the energy analysis in civil buildings is discussed in this work. In particular, the characterisation of the building envelope in situ and the energy analysis regarding the minimisation of net thermal energy demand for building air-conditioning and the optimisation of the performances of the HVAC systems are here considered, with particular attention also for retrofitting of existent heating systems. The characterisation of building envelope is here analysed through measurements of thermal conductance in situ and determination of air permeability of buildings by means of fan pressurisation method. A theoretical and experimental analysis of measurement apparatus, and a further study of the performances of the main post-processing methods for thermal conductance measurements are here taken into consideration, widening the existent knowledge of this kind of analyses; then targets, methods and results of a measuring campaign are discussed. Concerning the determination of air permeability of buildings by means of fan pressurisation test, methods for conducting the measurements are considered and the main infiltration models are treated. Moreover, results of a measuring campaign in situ are discussed, and a simulation analysis is done to analyse the possibility of implementing the infiltration models for some of the measured cases. Relating to building energy analysis, a simulation study of net air-conditioning energy demand for civil buildings is implemented and discussed, for evaluating the best possible solutions which lead to energy saving and in the meantime guarantee the respect of comfort conditions inside the building. Finally, concerning the optimisation of both building envelope and HVAC systems for civil buildings, a simulation analysis for evaluating heating energy demand is disposed, with particular regard to the generation systems. In particular, retrofitting of heating systems is analysed, the most energy efficient system for new buildings or buildings with an envelope improved on the point of view of thermal insulation is discussed, and the most suitable generation system for some cases of district heating is characterised.

Indice

1	Capitolo 1. Introduzione.....	1
1.1	Il sistema energetico internazionale e nazionale.....	1
1.2	La qualità ambientale ed il benessere negli edifici.....	7
1.2.1	Il benessere termoigrometrico.....	7
1.2.2	La qualità dell'aria.....	8
1.3	Obiettivi di questo lavoro.....	10
1.4	Bibliografia.....	12
2	Capitolo 2. La misura di conduttanza in opera.....	15
2.1	Il procedimento di misura.....	18
2.2	Metodi di post-processing.....	19
2.2.1	Il Metodo delle Medie Progressive.....	19
2.2.2	Il Metodo della Media Finestrata.....	20
2.2.3	Metodi di Black-Box.....	21
2.2.4	Il Metodo dell'analogia elettrica, il software LORD.....	29
2.3	Analisi teorica e sperimentale della strumentazione di misura.....	33
2.3.1	La misura di flusso termico specifico.....	33
2.3.2	La misura di temperatura.....	36
2.4	La misura teorica di conduttanza attraverso simulazioni FEM.....	36
2.4.1	L'effetto del regime dinamico nei dati di input.....	37
2.4.2	La perturbazione del flusso termico dovuta alla presenza del flussimetro.....	45
2.5	Gli effetti dell'emissività dell'intonaco e della superficie del flussimetro.....	49
2.6	Discussione dei risultati delle analisi FEM.....	52
2.7	Obiettivi e metodi di una campagna di misure di conduttanza in opera.....	54

2.8	Risultati della campagna di misure	58
2.9	Discussione dei risultati della campagna di misure.....	68
2.10	L'effetto della conduttanza sul fabbisogno energetico.....	70
2.11	Conclusioni.....	72
2.12	Bibliografia.....	74
3	Capitolo 3. La determinazione della permeabilità all'aria degli edifici attraverso prove di pressurizzazione mediante ventilatore.....	77
3.1	La prova di pressurizzazione e lo stato dell'arte	79
3.2	La ventilazione e l'infiltrazione	83
3.2.1	L'infiltrazione nel settore residenziale: metodi per la prova di pressurizzazione... 86	
3.2.2	La relazione tra permeabilità all'aria e infiltrazione.....	90
3.3	La strumentazione	93
3.4	Risultati di una campagna di misure	97
3.5	Discussione dei risultati.....	108
3.5.1	Prove con metodo A.....	108
3.5.2	Prove con metodo B.....	112
3.6	Analisi dei risultati ottenuti applicando i modelli di infiltrazione	114
3.7	Analisi numerica e confronto con valori sperimentali	117
3.8	Discussione dei risultati ottenuti da analisi numerica	123
3.9	Conclusioni.....	125
3.10	Bibliografia.....	127
4	Capitolo 4. Analisi energetiche nel settore civile	129
4.1	L'approccio analitico alle simulazioni	131
4.2	Analisi di un edificio tipo del settore terziario	134
4.2.1	Descrizione dell'edificio tipo.....	134
4.2.2	Descrizione del procedimento.....	138

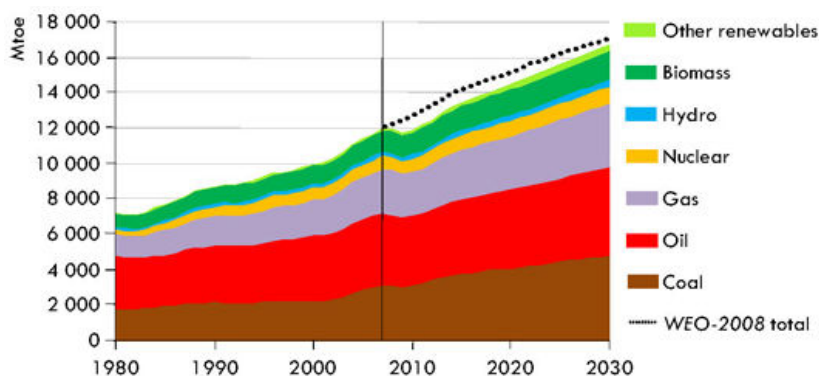
4.3	Risultati nel caso di edifici del settore terziario.....	140
4.4	Discussione dei risultati nel caso di edifici del settore terziario.....	142
4.5	Analisi di un edificio tipo del settore residenziale.....	143
4.5.1	Descrizione dell'edificio tipo	143
4.5.2	Descrizione del procedimento	146
4.6	Risultati nel caso di edifici nel settore residenziale.....	149
4.7	Discussione dei risultati nel caso di edifici nel settore residenziale.....	151
4.8	Conclusioni	153
4.9	Bibliografia	155
5	Capitolo 5. Retrofit di impianti di riscaldamento ed ottimizzazione del sistema edificio- impianto	157
5.1	I sistemi di conversione dell'energia	158
5.2	Analisi di diverse soluzioni per il riscaldamento in edifici esistenti e nuovi.....	165
5.3	Risultati dell'analisi	172
5.4	Discussione dei risultati	179
5.5	Reti di teleriscaldamento	181
5.6	Discussione dei risultati per reti di teleriscaldamento	184
5.7	Conclusioni	186
5.8	Bibliografia	188
6	Capitolo 6. Conclusioni.....	191

1 Capitolo 1. Introduzione

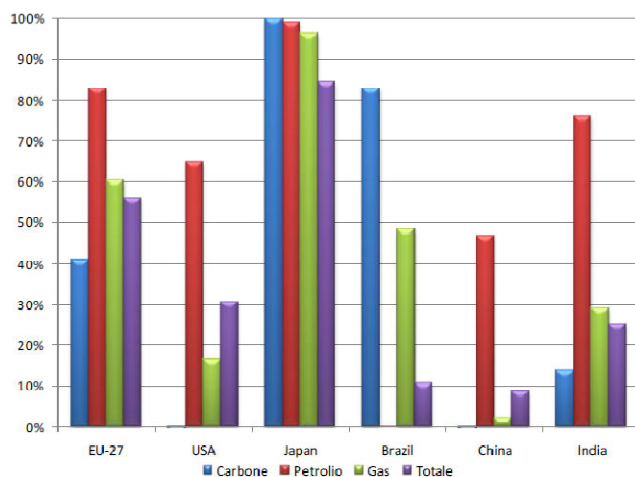
1.1 Il sistema energetico internazionale e nazionale

Secondo l'edizione del World Energy Outlook 2009 (WEO) (IEA 1 2010), nel 2009 per il primo anno dopo il 1981, si è vista una diminuzione della domanda di energia primaria a causa della crisi economica, e i mercati energetici si sono modificati sensibilmente. La crisi si è riflessa in una riduzione della domanda di energia dei settori industriale e domestico, prezzi inferiori ed un rallentamento negli investimenti. Il WEO 2009 indica come la caduta della domanda di energia primaria sia stata particolarmente rilevante nei paesi OCSE; negli USA la domanda di energia primaria nei primi sei mesi del 2009 è stata del 6% minore rispetto a quella dell'anno precedente, con una diminuzione del consumo di petrolio dell'8%. Anche in Europa, sempre secondo WEO 2009, si è osservata una diminuzione nella prima metà del 2009. Il petrolio è al primo posto come contributo al soddisfacimento della domanda di energia primaria mondiale, con una quota pari al 33% nel 2008 (Renewable Energy Information 2010); l'Oil Market Report indica che la domanda mondiale di petrolio è scesa del 3.3% e del 2.7% nei primi due trimestri del 2009 rispetto all'anno precedente, per poi mostrare una diminuzione più lieve nel terzo trimestre (-0.6%) e una ripresa nell'ultimo trimestre (0.8%). Il carbone è, dopo il petrolio, il combustibile più importante nella domanda di energia primaria mondiale, con una quota pari al 27% nel 2008. La quota dei paesi OCSE nella domanda mondiale di carbone è diminuita in modo consistente dal 1980 al 2009, dal 54% al 34%; nel 2009 le prime stime sugli investimenti nel settore del carbone indicano un forte calo rispetto ai livelli particolarmente elevati raggiunti nel 2007-2008 (WEO 2009). Il gas ha una quota pari al 21% nella domanda di energia primaria mondiale. Il WEO 2009 indica una diminuzione della domanda di gas in Europa, del 9% rispetto all'anno precedente in particolare in Italia (-14%), Spagna (-13%) e Regno Unito (-11%). Il nucleare, infine, contribuisce per il 6% al soddisfacimento della domanda di energia primaria mondiale. La Fig. 1.1.1.A riporta l'andamento della domanda mondiale di energia primaria ripartita per fonte energetica dal 1980 in poi e con le proiezioni dello Scenario di Riferimento (WEO 2009). Un'analisi dell'offerta di energia primaria TPES (composta dalla produzione indigena cui si sommano le importazioni ed eventuali quote dovute

alle riserve nazionali, e si sottraggono le esportazioni e i bunkeraggi ed eventuali quote dovute alle riserve nazionali), secondo gli ultimi bilanci IEA disponibili, indica che il petrolio costituisce la fonte di maggiore importanza in Giappone, USA e Unione Europea (rispettivamente il 45%, 39% e 35% della TPES), mentre in India e Cina tale ruolo è ricoperto dal carbone 66% e 41%. Per l'Unione Europea il gas è il secondo combustibile di maggiore importanza (25%), seguito dal carbone (19%). Negli USA petrolio e gas hanno praticamente pari importanza (24%), mentre il petrolio svolge un ruolo rilevante nella TPES della Cina (18%), essendo la quota del gas praticamente trascurabile (3%). Tali dati sono da analizzare contestualmente ai dati sulla dipendenza energetica (Fig. 1.1.1.B): metà del petrolio consumato in Cina nel 2007 è importato, più della metà in USA e India e la quasi totalità nell'Unione Europea.



(A)

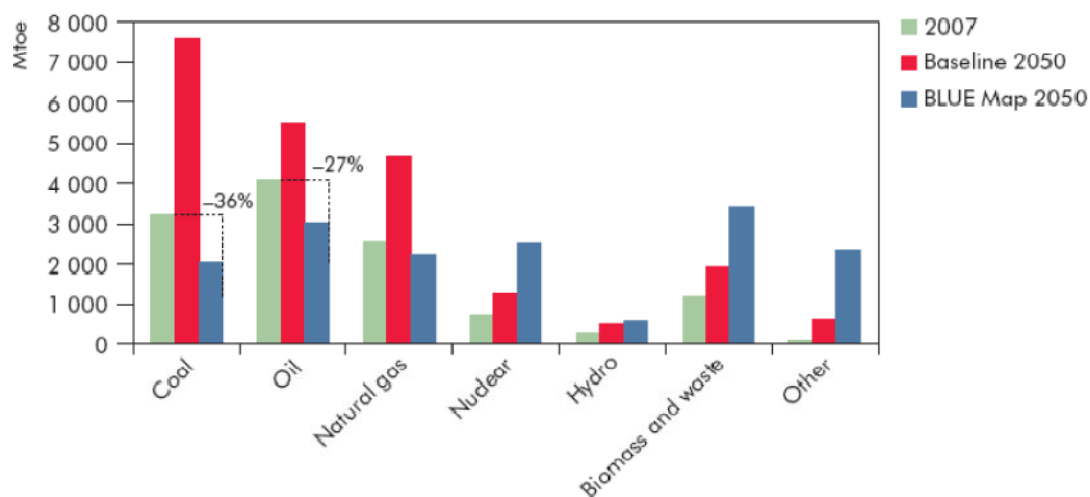


Fonte: elaborazioni ENEA

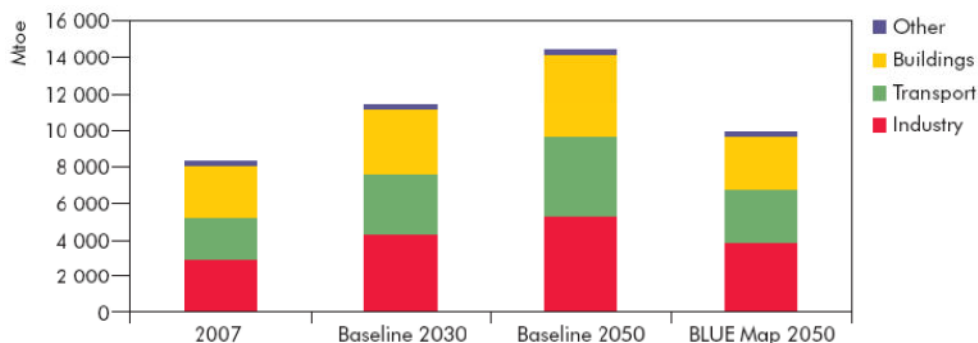
(B)

Fig. 1.1.1: (A) domanda mondiale di energia primaria ripartita per fonte nello Scenario di Riferimento, fonte: WEO 2009, (B) dipendenza energetica a. 2007 fonte: ENEA 2010.

Altre stime dell'IEA, (ETP 2010), propongono uno scenario tendenziale esteso fino al 2050, ed uno di accelerazione tecnologica (BLUE Map), le cui proiezioni sono riportate in Fig. 1.1.2; nella stessa figura si vede la ripartizione della domanda di energia nei vari settori, ed in particolare la marcata incidenza del settore civile sulla domanda totale.



(A)



(B)

Fig. 1.1.2: (A) domanda di energia primaria mondiale per fonte e scenario, (B) consumi finali di energia per settore a livello mondiale, fonte: IEA – ETP 2010

Per quanto riguarda l'Italia, secondo (ENEA 2010) la domanda di energia primaria nel 2009 si è attestata sui 180 Mtep, come riportato in Fig. 1.1.3. Il dato più evidente consiste nella riduzione delle fonti fossili petrolio e gas, rispettivamente in declino ed ascesa fino al 2008; inoltre si segnalano l'andamento stabile delle importazioni di energia elettrica e la dinamica crescente delle rinnovabili. In Fig. 1.1.4 sono evidenziati i consumi finali di energia per settore; si osserva una contrazione di circa il 5% rispetto al 2008, con un assestamento sui 133 Mtep. In particolare,

si notano una flessione del settore trasporti (-2%), una contrazione dei consumi dell'industria (-20%) in accordo con la forte flessione della produzione industriale (-13%), ed un incremento nel settore civile (+4%) collegato alla variabilità climatica. Per quest'ultimo settore, in dettaglio in Fig. 1.1.5, si osserva come gas ed elettricità siano predominanti.

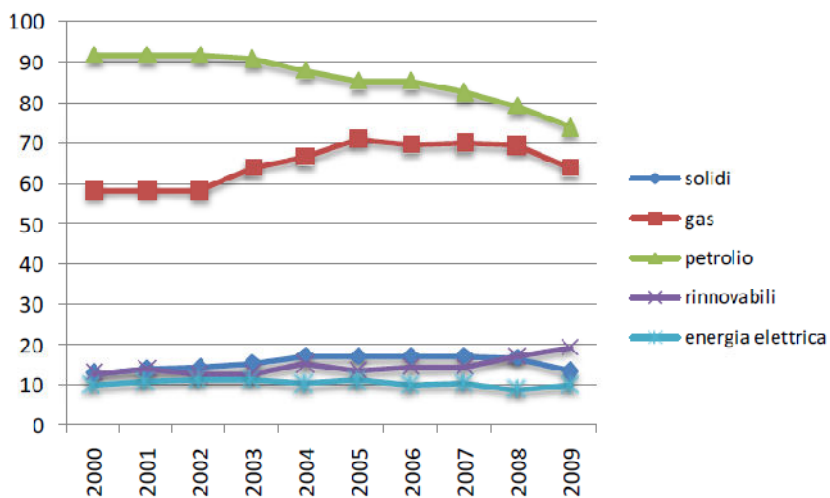


Fig. 1.1.3: domanda di energia primaria per fonte (Mtep) anni 2000-2009, fonte: elaborazione ENEA su dati MSE.

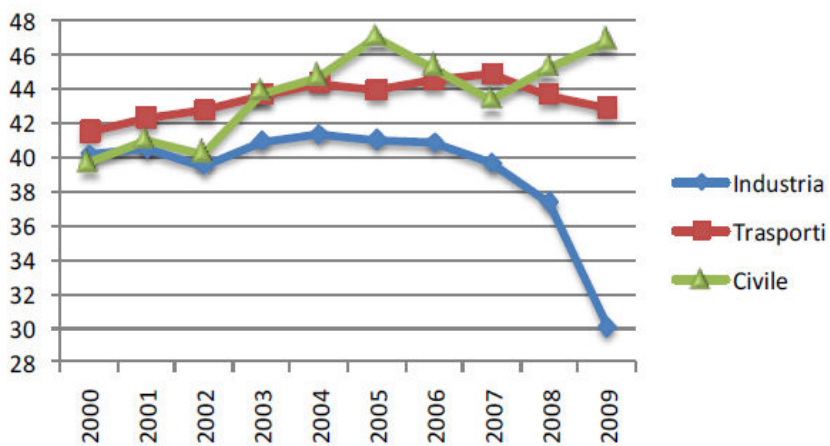


Fig. 1.1.4: consumi finali di energia per settore in Italia (Mtep) anni 2000-2009, fonte: elaborazione ENEA su dati MSE.

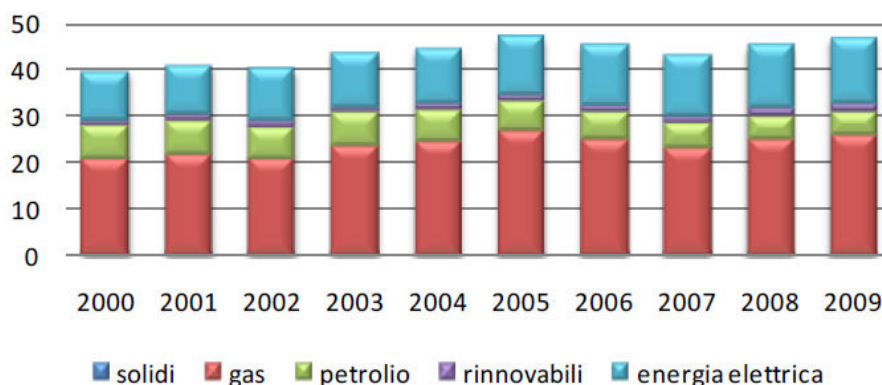


Fig. 1.1.5: consumi finali di energia per fonte nel settore civile (Mtep) anni 2000-2009, fonte: elaborazione ENEA su dati MSE.

Infine, la Fig. 1.1.6 riporta i dati relativi alla dipendenza energetica dell'Italia, che si attesta attorno all'85% mentre l'EU-27 si trova globalmente al 53% (Fig. 1.1.1.B).

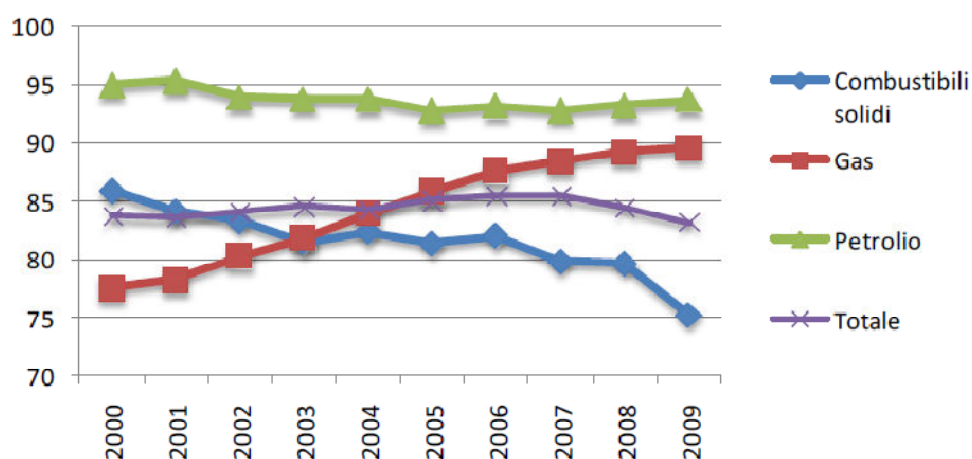


Fig. 1.1.6: dipendenza energetica totale e per fonte dell'Italia (percentuali), fonte: elaborazione ENEA su dati MSE

Quanto sinora esposto evidenzia, a livello nazionale ed internazionale, l'importanza di ridurre i consumi di energia in particolare dei settori residenziale e terziario. In tal senso, a livello europeo è stata emanata la direttiva 2002/91/CE che definisce misure atte al contenimento dei consumi nel settore civile; per un esame approfondito di tale direttiva si rimanda al testo della direttiva stessa (EC 2002). In Italia tale provvedimento è stato recepito attraverso i Decreti Legislativi DLgs 192/05 2005, DLgs 311/06 2006, e dal DPR 59/09 2009: per quanto riguarda nuove costruzioni, o interventi sull'esistente quali ristrutturazioni, sono stabiliti dei criteri di verifica, ad esempio sul fabbisogno per la climatizzazione estiva ed invernale e sulla trasmittanza termica

degli elementi di involucro. Nel 2010 è stata inoltre emanata la nuova direttiva europea 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia, non ancora recepita in Italia. L'involucro, dunque, deve essere progettato per garantire alte prestazioni energetiche; nel corso di questo lavoro si discuteranno aspetti relativi alla caratterizzazione dell'involucro stesso.

Secondo (Serraino, et al. 2005), a livello nazionale l'attenzione dei progettisti è molto più dedicata alle nuove edificazioni che alla riqualificazione di edifici esistenti; una delle motivazioni risiede nel fatto che la progettazione del nuovo permette una gamma molto ampia di soluzioni tecniche percorribili, mentre negli interventi di recupero il campo si restringe alle soluzioni in grado di conciliare prestazioni energetiche soddisfacenti con i vincoli posti dalla preesistenza. E' possibile agire sugli impianti convenzionali anziché sull'involucro per motivazioni economiche o perché, è ad esempio il caso dell'Italia, il patrimonio edilizio esistente è caratterizzato da caldaie con una vita superiore a 15-20 anni (Serraino, et al. 2005), e gli interventi sugli impianti termici non necessitano di interventi straordinari di integrazione all'interno dell'edificio, se si eccettuano le messe in sicurezza o gli adeguamenti necessari nel caso di passaggio ad un tipo di combustibile diverso da quello utilizzato precedentemente. Nella sostituzione del generatore di calore le principali alternative oggi disponibili sul mercato sono la caldaia a condensazione, quella ad alto rendimento, e la pompa di calore. In questo lavoro si valuteranno la minimizzazione dei fabbisogni netti di energia degli edifici legati alla climatizzazione estiva ed invernale per il settore terziario, la possibilità di effettuare il retrofit degli impianti di riscaldamento, e l'ottimizzazione del sistema edificio-impianto.

1.2 La qualità ambientale ed il benessere negli edifici

Una progettazione innovativa degli edifici deve prendere in considerazione sia gli aspetti relativi alle questioni energetiche che quelli relativi al comfort termoigrometrico negli ambienti indoor e alla qualità dell'aria.

1.2.1 *Il benessere termoigrometrico*

Il benessere termoigrometrico (o più comunemente comfort termico) è lo stato psicofisico in cui la persona esprime soddisfazione nei riguardi dell'ambiente termico che lo circonda (Fanger, 1970). Le principali teorie che propongono modelli per la previsione e la valutazione del comfort termico sono quella di Fanger (Fanger, 1970), (Fanger, 1988) e quella adattativa (Brager e De Dear 1998). Il modello di Fanger si basa su un modello termodinamico del corpo umano al quale è possibile applicare una equazione di bilancio termico; tale bilancio prende in considerazione la generazione interna di calore (attività metabolica) e tutti gli scambi energetici tra il corpo e l'ambiente per conduzione attraverso l'abbigliamento, per convezione e irraggiamento. Per mettere in relazione le condizioni fisiche ambientali con la sensazione di neutralità termica percepita da una persona standard vengono definiti gli indici PMV, ossia il voto medio previsto, e PPD, ovvero la percentuale prevista di persone insoddisfatte. Per una trattazione dettagliata dell'argomento si faccia riferimento al capitolo 9 dell'ASHRAE Handbook of Fundamentals (2009) (ASHRAE, Handbook of Fundamentals 2009). Il modello di Fanger è stato recepito a livello normativo in ISO 7730 (la cui ultima versione è aggiornata al 2007). Brager e De Dear (Brager e De Dear 1998), invece, hanno sviluppato un modello per prevedere la temperatura operativa interna preferita dalle persone in funzione della temperatura media mensile. Il modello si applica solo a edifici nei quali non sia presente un sistema meccanico per il raffrescamento degli ambienti e la temperatura venga controllata aprendo e chiudendo le finestre o per ventilazione naturale. Inoltre il modello è applicabile solo se si tiene conto della possibilità, da parte degli occupanti, di variare il grado di isolamento termico variando l'abbigliamento, cosa comunemente possibile negli edifici residenziali. Per una trattazione dettagliata del modello si confronti (Brager e De Dear 1998). Secondo (Raisa, Schiavon e Zecchin 2010) il modello di Fanger è adatto a valutare il comfort negli edifici residenziali dove è presente un sistema di ventilazione o un sistema di climatizzazione estiva, mentre per edifici residenziali in cui il

microclima interno nel periodo estivo venga controllato dall'apertura e chiusura delle finestre è più indicato il modello adattativo.

1.2.2 La qualità dell'aria

Per quanto riguarda la qualità dell'aria esterna, l'emissione continua e rilevante di inquinanti e le condizioni locali di calma atmosferica possono favorire la presenza stagnante degli inquinanti stessi in particolare nelle aree urbane. Secondo quanto riportato in (Raisa, Schiavon e Zecchin 2010) gli inquinanti tipici da tenere in considerazione nella valutazione dell'aria esterna ai fini della progettazione termotecnica sono il monossido di carbonio, il biossido di carbonio, il biossido di zolfo, gli ossidi di azoto e i composti organici volatili. La direttiva europea DE 2008/50/CE definisce i limiti per la presenza di inquinanti nell'aria esterna per la tutela della salute umana. Esistono provvedimenti atti a ridurre l'esposizione agli inquinanti presenti nell'aria esterna quando si è all'interno di un ambiente; in particolare le principali strategie sono la limitazione della permeabilità all'aria dell'edificio stesso, la pressurizzazione degli ambienti da proteggere, la ventilazione e filtrazione. Nel Capitolo 3 verranno approfonditi aspetti che riguardano la definizione della proprietà di permeabilità all'aria degli edifici ed il tasso di ricambio orario. Per quanto riguarda la qualità dell'aria interna, l'ASHRAE Standard 62.1 definisce come qualità dell'aria interna accettabile quella in cui 'non ci sono contaminanti noti a concentrazioni nocive così come stabilito dalle autorità competenti e dove la sostanziale maggioranza (80% o più) delle persone non è insoddisfatta dell'aria a cui è esposta'. Nelle abitazioni i principali problemi sono legati agli inquinanti generati dalle persone (bioeffluenti, vapore, ecc), dalle loro attività, dai materiali presenti all'interno dell'edificio e dai processi di combustione per il riscaldamento e la produzione d'acqua calda sanitaria. Non è previsto (Raisa, Schiavon e Zecchin 2010), al momento, un valore limite per ciascuno degli inquinanti presenti nell'aria, ma correntemente si controllano le concentrazioni di anidride carbonica e vapore. Il vapore acqueo all'interno degli edifici viene principalmente generato dall'attività metabolica degli occupanti; una presenza in quantità eccessiva di vapor d'acqua può generare muffe o dare luogo alla proliferazione di microrganismi. In (Raisa, Schiavon e Zecchin 2010) si trovano alcuni valori tipici della produzione di vapore da parte di occupanti in diverse occupazioni. Per quanto riguarda le muffe, le condizioni più favorevoli di sviluppo sono una temperatura compresa tra 18-32°C, ed umidità relativa superiore al 60%. La presenza di muffe è associata all'insorgere di

malattie legate all'apparato respiratorio ed a reazioni allergiche, inoltre vi possono essere problemi legati alla produzione di composti molto tossici, quali le micotossine, che possono causare infezioni di vario genere. Per quanto concerne l'anidride carbonica, essa deriva principalmente da combustione e respirazione; esposizioni a concentrazioni superiori al 15% sono fatali. Nell'Ashrae Handbook – Fundamentals 2009 (ASHRAE, Handbook of Fundamentals 2009) sono presenti valori soglia per i principali inquinanti in ambiente interno.

1.3 Obiettivi di questo lavoro

A seguito di quanto discusso finora, e con particolare riguardo al caso italiano, si è evidenziato come una consistente quota parte della domanda di energia sia concentrata nel settore civile; risulta pertanto indispensabile agire sulla riduzione dei consumi per la climatizzazione degli edifici. I provvedimenti legislativi richiamati in questo capitolo stabiliscono criteri di efficienza energetica per la progettazione nell'ottica di principi di ecosostenibilità. Tuttavia è di fondamentale importanza che l'edificio rispetti in opera quanto prescritto in sede progettuale affinché il contenimento dei consumi ipotizzato sia garantito. Parallelamente, anche per edifici nuovi o per i quali si siano previsti interventi di riqualificazione energetica dell'involucro, è opportuno individuare, assicurando comunque il soddisfacimento delle condizioni di comfort, la strategia di gestione di impianto più vantaggiosa per la climatizzazione. Per quanto riguarda il raffrescamento estivo, che è diventato un fabbisogno indispensabile negli ultimi anni specialmente per il settore terziario, è importante stabilire se un approccio semplificato per la valutazione del fabbisogno per la climatizzazione estiva sia efficace, oppure se sia necessario considerare l'approccio dinamico, onde evitare sottostime o sovrastime rispetto al fabbisogno reale; allo stesso tempo, occorre individuare una corretta gestione dell'impianto, in funzione della particolare tipologia costruttiva. Per quanto concerne la climatizzazione invernale si segnala l'opportunità di studiare la possibilità di ridurre i consumi anche per edifici esistenti senza intervenire a livello di involucro, ad esempio per edifici storici o per i quali la riqualificazione dell'involucro sia economicamente onerosa, dal momento che in Italia, come si vedrà nel Capitolo 5, una notevole percentuale di edifici del parco esistente risale a periodi in cui non vi era particolare attenzione ai temi del risparmio energetico. In tal senso, si rivela interessante il retrofit di impianti esistenti, che preveda una sostituzione dei vecchi sistemi di generazione dell'energia termica con soluzioni più moderne ed efficienti. Gli obiettivi perseguiti in questo lavoro sono indirizzati verso quest'ottica globale dell'edificio e dell'impianto. Nei Capitoli 2 e 3, infatti, si discutono aspetti migliorativi ed innovativi di misure che possano caratterizzare lo stato dell'involucro in opera, e che siano quindi utili a stabilire se l'edificio costruito rispetti quanto prescritto in sede progettuale. Le misure prese in considerazione riguardano la conduttanza termica degli elementi opachi d'involucro e la determinazione della permeabilità all'aria dell'involucro stesso (quest'ultima grandezza è strettamente correlata all'infiltrazione); entrambe queste grandezze influiscono direttamente sul fabbisogno di energia

per la climatizzazione dell'edificio. In particolare, riguardo le misure di conduttanza in opera, si discute un'analisi teorica volta ad ampliare la conoscenza delle problematiche riscontrate, analizzando le modalità del processo di misura stesso; successivamente sono presentati obiettivi, metodi e risultati di una campagna di misure in opera, con conseguente applicazione dei risultati ottenuti alla valutazione del fabbisogno di energia per il riscaldamento degli edifici. Anche per quanto riguarda la determinazione della permeabilità all'aria dell'edificio, sono discussi obiettivi e metodi di una campagna di prove di pressurizzazione in opera, completando lo studio mediante simulazioni al fine di ricavare l'indice di ricambi orari di un involucro a partire dai risultati delle misure stesse. Nel Capitolo 4, invece, si presenta da un lato lo studio, attraverso simulazioni dinamiche, per individuare l'entità dei fabbisogni per la climatizzazione estiva ed invernale di edifici dei settori residenziale e terziario, e dall'altro i problemi relativi alle ipotesi di calcolo della norma UNI/TS 11300-1:2008 nel caso di raffrescamento sensibile. Inoltre, sono valutate tipologie costruttive e di gestione dell'edificio diverse a parità di caratteristiche di isolamento termico. Nel Capitolo 5, infine, si valutano, attraverso simulazioni, la convenienza di effettuare il retrofit di impianti esistenti per il riscaldamento, la migliore soluzione impiantistica per edifici con ottime caratteristiche di isolamento termico e la possibilità di gestire in maniera vantaggiosa alcuni casi di teleriscaldamento.

1.4 Bibliografia

Alfano, G, M Filippi, e E Sacchi. Impianti di climatizzazione per l'edilizia dal progetto al collaudo. Milano: Masson spa, 1997.

ASHRAE. Handbook of Fundamentals. 2009.

Brager, G S, e R J De Dear. «Thermal adaptation in the built environment: a literature review.» *Energy and Buildings*, n. 27 (1998): 83-96.

DLgs 192/05. «Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.» *Gazzetta Ufficiale* n.222 del 23 Settembre 2005 suppl. ord. n. 158, 19 Agosto 2005.

DLgs 311/06. «Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311. Disposizioni correttive ed integrative al Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.» *Gazzetta Ufficiale* n.26 del 1 Febbraio 2007 suppl. ord. n. 26/L., 29 Dicembre 2006.

DPR 412/93. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia. *Gazzetta Ufficiale* n.96 del 14/10/1993 in attuazione dell'art. 4, comma 4 della Legge 9 Gennaio 1991, N.10, Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, 1993.

DPR 59/09. «Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n. 59. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico.» *Gazzetta Ufficiale* n.132 del 10 Giugno 2009, 2 Aprile 2009.

EC. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Communities*, 2002.

ENEA. Rapporto Energia e Ambiente, Analisi e Scenari 2009. Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, 2010.

Fanger, P O. «A comfort equation for indoor air quality and ventilation.» *Proceedings of Healthy Buildings Vol. 1*. 1988. 39-51.

—. *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. New York: McGraw-Hill, 1970.

IEA 1. *World Outlook 2009, The authoritative source of energy analysis and projections*. IEA, International Energy Agency, 2010.

IEA 2. Energy Technology Perspectives 2010, Scenarios and strategies to 2050. IEA, International Energy Agency, 2010.

Raisa V., Schiavon S., e Zecchin R.. Teoria e tecnica della ventilazione, soluzioni per l'edilizia residenziale e per il piccolo terziario. Milano: Editoriale Delfino, 2010.

Serraino, M, L Degiorgis, M Simonetti, e G V Fracastoro. «Interventi sostenibili di riqualificazione energetica degli edifici.» AICARR. Bologna 13 Ottobre 2005, 2005.

2 Capitolo 2. La misura di conduttanza in opera

Riassunto

In questo capitolo si discute l'influenza di alcuni fattori sul risultato della misura di conduttanza in opera. In particolare sono considerate la presenza del regime dinamico nei dati di input e l'effetto dovuto alla perturbazione generata dalla presenza del flussimetro sul componente edilizio, ed è valutata la loro influenza sul metodo di post-processing implementato. Inoltre, si considera l'effetto sul risultato finale della misura di una differenza di emissività tra superficie del flussimetro ed intonaco. Successivamente si discutono i risultati di una campagna di misure di conduttanza termica in opera per edifici in Veneto e Friuli Venezia Giulia, e si applicano i risultati ottenuti per valutare l'influenza della conduttanza stessa sul fabbisogno netto di energia per la climatizzazione invernale.

Nomenclatura

C	conduttanza termica specifica [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
U	trasmittanza termica specifica [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
C_{nom}	valore nominale di conduttanza termica specifica [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
C'_{nom}	valore nominale di conduttanza termica specifica comprensiva di elemento e flussimetro [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
C_{AM}	conduttanza termica specifica risultante da analisi con Metodo delle Medie Progressive [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
C_{DAM}	conduttanza termica specifica risultante da analisi con Metodo della Media Finestrata [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
C_{BB}	conduttanza termica specifica risultante da analisi con Metodo di Black Box [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
C_{LORDt}	conduttanza termica specifica risultante da analisi con software LORD e temperatura superficiale interna come output [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
C_{LORDq}	conduttanza termica specifica risultante da analisi con software LORD e flusso termico specifico interno come output [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
q_0	flusso termico specifico corrispondente all'elemento di involucro indisturbato [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
q_i	flusso termico specifico registrato dal flussimetro [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
q_{i1}	flusso termico specifico letto da una piastra termoflussimetrica ideale della stessa dimensione dell'elemento di involucro [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
\bar{q}_0	valore medio del flusso termico specifico corrispondente all'elemento di involucro indisturbato [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
\bar{q}_i	valore medio del flusso termico specifico registrato dal flussimetro [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
\bar{q}_{i1}	valore medio del flusso termico specifico letto da una piastra termoflussimetrica ideale della stessa dimensione dell'elemento di involucro [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
T	temperatura assoluta [K]
t	temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
t_i	temperatura superficiale interna dell'elemento di involucro [$^{\circ}\text{C}$]
t_e	temperatura superficiale esterna dell'elemento di involucro [$^{\circ}\text{C}$]
t_{ia}	temperatura dell'aria dell'ambiente interno [$^{\circ}\text{C}$]
t_r	temperatura della stanza [$^{\circ}\text{C}$]
t_f	temperatura superficiale del flussimetro [$^{\circ}\text{C}$]

λ	conducibilità termica [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
R_w	resistenza termica specifica dell'elemento di involucro [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]
R_{hi}	resistenza liminare specifica lato interno [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]
R_f	resistenza termica specifica del termoflussimetro [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]
h_i	coefficiente di scambio liminare dell'ambiente interno [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
h_{ci}	coefficiente convettivo della superficie interna [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
c_p	calore specifico [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
ρ	densità [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
s	spessore [m]
ε	emissività
α	diffusività termica [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
C_e	capacità elettrica [F]
H	conduttanza elettrica [S]
HFM	termoflussimetro
HFMR	letture di flusso termico specifico operate dal flussimetro
NHF	flusso termico specifico nominale
NV	valore nominale
F_N	fabbisogno netto per la climatizzazione invernale di un edificio calcolato con le conduttanze nominali per elementi di involucro [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$]
F_N'	fabbisogno netto per la climatizzazione invernale di un edificio calcolato con le conduttanze interpolate da analisi LORD_q per elementi di involucro [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$]

2.1 Il procedimento di misura

La misura di conduttanza in opera può essere uno strumento utile per valutare il reale fabbisogno energetico di un edificio per la climatizzazione invernale e permettere lo sviluppo di metodi per l'incremento dell'efficienza energetica. Tuttavia, ad oggi, ancora molti aspetti legati a tale misura restano da approfondire. Tra questi la presenza del flussimetro con le sue caratteristiche, e le performance dei vari metodi di analisi assumono una forte rilevanza: la misura di conduttanza in opera prevede, infatti, la registrazione di serie di dati di temperatura superficiale interna ed esterna del componente e di flusso termico interno, e successivamente una fase di post-processing. In passato, due system identification-competitions sono state organizzate per analizzare in dettaglio le problematiche legate a questo processo; in (Bloem, 1994) e (Bloem, Norlén, et al. 1996) si riportano i risultati che dimostrano la possibilità di ottenere risultati diversi a partire dagli stessi dati di input. Il riassunto di tali risultati è riportato in (Androutsopoulos, et al. 2008). Nell'ambito del progetto PASLINK sono state sviluppate procedure per la caratterizzazione termica di componenti in condizioni dinamiche reali: uno degli obiettivi di questo gruppo è stato di assicurare la qualità della prova e dei risultati, ed all'interno della stessa cornice sono state organizzate diverse attività per migliorare l'abilità di analisi dei partecipanti. Ampi studi nell'ambito del progetto PASLINK, fra cui recentemente (Jiménez, Porcar e Heras, 2008), sono stati disposti sulle test cells PASSYS, le cui caratteristiche sono esposte in (Wouters, et al. 1993). Gli studi della rete PASLINK sono stati sviluppati ulteriormente nel progetto europeo IQ-TEST come discusso in (Androutsopoulos, et al. 2008) e (Baker 2004). Confronti tra risultati ottenuti con i diversi metodi sono riportati in letteratura; in (Jiménez, Porcar, et al., 2009) si discute la possibile concordanza di risultati ottenuti applicando le diverse metodologie di post-processing allo stesso e a differenti dataset su un elemento di involucro le cui caratteristiche siano note. L'effetto della perturbazione del flusso termico introdotto dalla presenza del flussimetro è stato analizzato in (Trethowen 1986). In questo capitolo viene dapprima discussa un'analisi riguardante gli aspetti succitati, dunque lo studio dei risultati ottenuti applicando allo stesso componente differenti dataset e metodi di post-processing, ovvero i metodi delle Media Progressive (ISO 9869:1994) e (Bloem, 1994), della Media Finestrata (Bloem, 1994), di Black Box utilizzando il MATLAB IDENT toolbox come riportato in (Jiménez, Madsen e Andersen, 2008), e la metodologia adottata nel software LORD (Gutschker, 2004), (Gutschker, 2008). Successivamente si è studiato l'effetto dovuto alla presenza del

flussimetro sull'elemento di prova. Come ulteriore analisi, si è valutato l'effetto dovuto ad una differenza di emissività tra intonaco interno e superficie del flussimetro sul risultato finale. Sono riportati, inoltre, i risultati di una campagna di misure di conduttanza in opera, dal 2006 al 2010 per edifici del Veneto e Friuli Venezia Giulia: tali risultati sono stati confrontati con i valori di progetto. Infine, si è eseguito uno studio per considerare l'influenza della conduttanza sulla valutazione del fabbisogno per la climatizzazione invernale dell'edificio.

2.2 Metodi di post-processing

2.2.1 Il Metodo delle Medie Progressive

Il Metodo delle Medie Progressive consiste nell'ottenere la conduttanza considerando la differenza di temperatura media tra le superfici ed il flusso termico specifico medio, ove la media ad ogni passo temporale è calcolata in base ai valori delle stesse grandezze nei precedenti istanti di tempo secondo Eq. 2.1 ed Eq. 2.2.

$$\bar{t}(\tau_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t(\tau_i)$$

Eq. 2.1

$$\bar{q}(\tau_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q(\tau_i)$$

Eq. 2.2

La conduttanza media ad ogni istante di tempo si ricava da Eq. 2.3.

$$C(\tau_i) = \frac{\bar{q}(\tau_i)}{\bar{t}_i(\tau_i) - \bar{t}_e(\tau_i)}$$

Eq. 2.3

Se la prova ha durata sufficiente il risultato dovrebbe raggiungere la convergenza ad un valore asintotico. Secondo (ISO 9869:1994), questo valore può essere quello che meglio approssima il

comportamento della struttura se sono rispettate le seguenti condizioni: non ci sono variazioni nella temperatura interna dell'elemento e della distribuzione dell'umidità, dunque il calore immagazzinato dall'elemento non subisce variazioni durante la misura, il flussimetro non è esposto a radiazione solare, la conduttanza termica dell'elemento è costante durante la prova.

Inoltre, per elementi pesanti, ovvero che hanno una capacità specifica per unità di area di più di $20 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, l'analisi deve comprendere un periodo che sia multiplo intero di 24 h. In questo caso il metodo della media può ritenersi attendibile se le seguenti condizioni sono rispettate:

- la durata della prova supera 72 h;
- la stima alla fine dei giorni di misura non varia di più del $\pm 5\%$ dalla stima alla fine delle 24 h precedenti;
- il risultato che si ottiene analizzando i primi 2/3 della durata della prova non varia di più del $\pm 5\%$ rispetto la stima corrispondente agli ultimi 2/3 della prova stessa;
- la variazione di energia interna del muro è minore del 5% del flusso termico passante attraverso l'elemento nel periodo di durata della prova.

Questi criteri sono rispettati se le condizioni di prova sono stabili e ben controllate; ciò non si verifica spesso nei casi reali. Come svantaggi, questo metodo non considera la capacità termica e la prova ha una durata considerevole.

Secondo (Bloem, Norlén, et al. 1996), il metodo delle Medie Progressive può essere considerato una tecnica semplificata di analisi che può fornire informazioni preliminari sui dati misurati e può essere utile come primo passo nel processo di analisi.

2.2.2 *Il Metodo della Media Finestrata*

Come menzionato in (Bloem, Norlén, et al. 1996), anziché applicare il metodo della media sull'intera durata delle serie di dati è possibile considerare solo una finestra temporale di un giorno attraverso cui eseguire il filtro; in questo modo sono rilevanti i valori medi per ogni timestep dei giorni a partire dal secondo. Il risultato che si può ottenere è il valore medio di ogni giorno e la deviazione standard. E' possibile considerare come rappresentativo della prova il risultato ottenuto nel giorno centrale se non vi è una oscillazione troppo marcata del risultato.

2.2.3 Metodi di Black-Box

Si richiamano, in questo paragrafo, alcuni concetti relativi ai metodi di Black-Box come riportati in (Jiménez, Madsen e Andersen, 2008), (Ljung 1999), (Bloem, 1994), (Bloem, Norlén, et al. 1996); in particolare ci si riferisce a modelli ARMAX, utilizzati per stimare le caratteristiche termiche di elementi d'involucro. Per modelli lineari ed invarianti si definisce la risposta d'impulso h_k che descrive la relazione tra segnale di input u_t e segnale di output y_t . Per sistemi single-input single-output (SISO) la funzione risposta d'impulso h_k può essere espressa come Eq. 2.4.

$$y_t = \sum_{k=0}^{\infty} h_k u_{t-k}$$

Eq. 2.4

ovvero secondo Eq. 2.5:

$$h(z) = h_0 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_n z^{-n}$$

Eq. 2.5

dove $z^{-1}y_t = y_{t-1}$ è l'operatore di back-shift e $h(z)$ è la funzione di trasferimento.

La relazione tra input e output può essere scritta come Eq. 2.6.

$$y_t = h(z)u_t$$

Eq. 2.6

Questo è il caso ideale; in realtà va introdotto il termine di rumore N_t come in Eq. 2.7.

$$y_t = h(z)u_t + N_t$$

Eq. 2.7

La funzione risposta d'impulso è la descrizione più flessibile di sistemi lineari temporalmente invarianti (i modelli a parametri concentrati sono un sottoinsieme di tali sistemi). Le relazioni in

regime stazionario tra l'input u_t e l'output y_t si ricavano considerando $z = 1$, che equivale a considerare u_t e y_t costanti. E' prassi comune esprimere quanto finora espresso nel dominio delle frequenze; la funzione risposta in frequenza descrive come il sistema reagisca a singole frequenze. Un'analisi più dettagliata del problema è riportata in (Ljung 1999). Il numero di parametri della funzione risposta d'impulso è illimitato, ma in molte situazioni il sistema può essere descritto mediante approssimazione con un numero finito di parametri. Per comodità, si usa scrivere la funzione di trasferimento in forma di rapporto:

$$h(z) = \frac{B(z)}{A(z)} z^{-b}$$

dove $A(z)$ e $B(z)$ sono polinomi nell'operatore z

$$A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_r z^{-r}$$

$$B(z) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_s z^{-s}$$

e b è il ritardo di timesteps tra input ed output. Dunque l'Eq. 2.7 può essere espressa come Eq. 2.8.

$$y_t = \frac{B(z)}{A_1(z)} z^{-b} u_t + N_t$$

Eq. 2.8

Per un'esame più dettagliato dei vari metodi di Black-Box si rimanda a (Jiménez, Madsen e Andersen, 2008), (Ljung 1999), (Bloem, 1994) e (Bloem, Norlén, et al. 1996).

In (Jiménez, Madsen e Andersen, 2008) è riportata la dimostrazione della possibilità di passare da reti RC a modelli ARMAX con riferimento ad un semplice esempio; tale dimostrazione è richiamata brevemente qui di seguito. L'esempio, riportato in Fig. 2.2.1, consiste in un elemento d'involucro di una test cell (Bloem, Norlén, et al. 1996), (Wouters, et al. 1993), (Jiménez, Porcar e Heras 2008), in cui il flusso termico è dovuto ad una differenza di temperatura tra interno ed esterno ed alla radiazione solare incidente. Si può dunque impostare il bilancio in Eq. 2.9:

$$q = U(t_i - t_e) - gG_v$$

Eq. 2.9

In caso di sollecitazioni dinamiche deve essere considerata anche la capacità termica dell'elemento stesso come condensatore nella rete resistiva equivalente RC_e. Se si considerano le resistenze liminari lato interno ed esterno e l'elemento di involucro associando ad essi la conduttanze H₁, H₂ e H₃, e le capacità C_{e1} e C_{e2}, si può definire la trasmittanza termica equivalente U come in Eq. 2.10:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} + \frac{1}{H_3}$$

Eq. 2.10

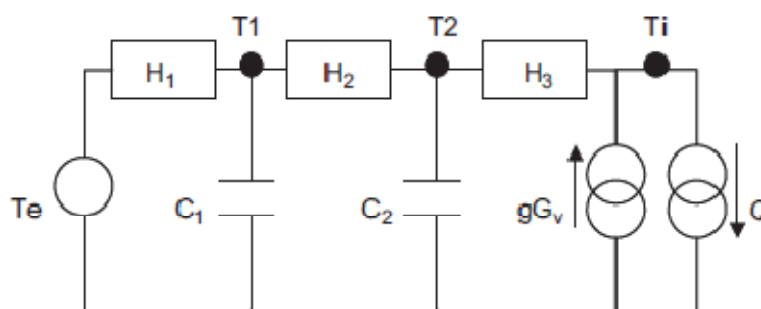


Fig. 2.2.1: esempio di semplice rete RC_e che rappresenta il comportamento termico di un elemento opaco di involucro, fonte: (Jiménez, Madsen e Andersen 2008).

Per quanto riguarda l'output del sistema, gli approcci tradizionali sono di considerare o la temperatura interna T_i o il flusso termico specifico q.

Il modello dinamico del sistema, non considerando per semplicità l'apporto solare, e con riferimento alle temperature assolute come in Fig. 2.2.1 è espresso dalle Eq. 2.11, Eq. 2.12, Eq. 2.13.

$$C_{e1} \frac{dT_1}{dt} = H_1(T_e - T_1) + H_2(T_2 - T_1) + \frac{d\omega_1}{dt}$$

Eq. 2.11

$$C_{e2} \frac{dT_2}{dt} = H_2(T_1 - T_2) + H_3(T_i - T_2) + \frac{d\omega_2}{dt}$$

Eq. 2.12

$$q = H_3(T_i - T_2) + e$$

Eq. 2.13

dove i dati registrati sono le serie di T_e , T_i e q , con gli errori di misura $d\omega_1$, $d\omega_2$ e e (e è il corrispondente rumore bianco, mentre ω_1 e ω_2 sono due processi indipendenti di Wiener con deviazioni standard σ_1 e σ_2 (Ljung 1999)). Riadattando i termini nelle equazioni Eq. 2.11, Eq. 2.12, Eq. 2.13 si ottiene Eq. 2.14:

$$\begin{bmatrix} dT_1 \\ dT_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_1}(H_1 + H_2) & \frac{H_2}{C_1} \\ \frac{H_2}{C_2} & -\frac{1}{C_2}(H_2 + H_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \frac{H_1}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{H_3}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_e \\ T_i \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} d\omega_1 \\ d\omega_2 \end{bmatrix}$$

Eq. 2.14

Con l'introduzione dei coefficienti a_{ij} e b_{ij} e applicando la trasformata di Laplace si ottiene Eq. 2.15.

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} b_{11}(s + a_{22}) & a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} & b_{22}(s + a_{11}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_e \\ T_i \end{bmatrix}}{\det A}$$

Eq. 2.15

L'equazione equivalente ad Eq. 2.13 è Eq. 2.16.

$$q = c(T_i - T_2) + e$$

Eq. 2.16

La sostituzione di Eq. 2.15 in Eq. 2.16 porta a Eq. 2.17.

$$q = cT_i - c \frac{a_{21}b_{11}T_e + b_{22}(s + a_{11})T_i}{\det A} + e$$

Eq. 2.17

che è un modello ARMAX della forma in Eq. 2.18.

$$A(z)q = B_1(z)T_e + B_2(z)T_i + C(z)e$$

Eq. 2.18

Tale modello può essere facilmente esteso considerando la presenza della radiazione solare. Se si seleziona T_i come variabile di output il modello diventa

$$A(z)T_i = B_1(z)T_e + B_2(z)q + C(z)e$$

Eq. 2.19

I metodi più utilizzati per la stima dei parametri sono il metodo dell'Errore di Output OEM e il metodo dell'Errore di Predizione PEM. Nel metodo OEM i parametri sono stimati come Eq. 2.20

$$\hat{\Theta} = \arg \min_{\Theta} \left\{ S(\Theta) = \sum_{t=1}^N N_t^2(\Theta) \right\}$$

Eq. 2.20

con

$$N_t(\Theta) = y_t - \frac{B(z)}{A_1(z)} z^{-b} u_t$$

Eq. 2.21

$N_t(\Theta)$ è l'errore di simulazione, la deviazione tra l'output y_t e l'output simulato dal modello. La matrice di covarianza per le stime dei parametri è spesso difficile da calcolare usando il metodo OEM, inoltre le più note tecniche per la validazione non possono essere applicate. Perciò si usa tale metodo solo in speciali condizioni. La stima dell'errore di predizione secondo PEM, invece, si trova minimizzando la somma degli errori di predizione al quadrato come in Eq. 2.22.

$$\hat{\Theta} = \arg \min_{\Theta} \left\{ S(\Theta) = \sum_{t=1}^N \varepsilon_t^2(\Theta) \right\}$$

Eq. 2.22

dove

$$\varepsilon_t(\Theta) = Y_t - \hat{Y}_{t/t-1}(\Theta)$$

Eq. 2.23

In Eq. 2.23 è espresso l'errore di predizione a singolo passo. Se le predizioni sono calcolate usando il modello corretto, allora l'errore di predizione a singolo passo diventa un processo di rumore bianco. Usando diversi test per il rumore bianco è possibile effettuare la validazione, inoltre la matrice di covarianza per le stime dei parametri è facilmente ottenuta usando il metodo dell'errore di predizione.

Il valore di trasmittanza U può essere ottenuto attraverso un modello ARMAX in regime stazionario ($z=1$). Considerando l'Eq. 2.19:

$$U_1 = \frac{A(1)}{B_2(1)}$$

Eq. 2.24

$$U_2 = \frac{B_1(1)}{B_2(1)}$$

Eq. 2.25

dove

$$A(1) = \left(1 + \sum_{i=1}^r a_i \right);$$

Eq. 2.26

$$B_1(1) = \left(\sum_{i=0}^s b_{1i} \right)$$

Eq. 2.27

$$B_2(\mathbf{1}) = \left(\sum_{i=0}^s b_{2i} \right);$$

Eq. 2.28

$$B_3(\mathbf{1}) = \sum_{i=0}^s b_{3i}$$

Eq. 2.29

In ogni caso il valore di U è funzione dei parametri $U_i=f_i(\Theta)$ dove

$$\Theta = (a_1, a_2, \dots, a_r, b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1s}, b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2s}, b_{31}, b_{32}, \dots, b_{3s})^T$$

Eq. 2.30

A partire dalla matrice di covarianza $V(\Theta)$ delle stime dei parametri, la varianza dei valori individuali di U può essere ottenuta dalla formula della propagazione dell'errore secondo Eq. 2.31

$$V(U) = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{pmatrix} = \left(\frac{\partial f}{\partial \Theta} \right) V(\Theta) \left(\frac{\partial f}{\partial \Theta} \right)^T$$

Eq. 2.31

dove

$$f(\Theta) = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}$$

Eq. 2.32

perciò

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \Theta} \right) = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_1}{\partial a_1} \dots \frac{\partial U_1}{\partial a_r} & \frac{\partial U_1}{\partial b_{11}} \dots \frac{\partial U_1}{\partial b_{1s}} & \frac{\partial U_1}{\partial b_{21}} \dots \frac{\partial U_1}{\partial b_{2s}} & \frac{\partial U_1}{\partial b_{31}} \dots \frac{\partial U_1}{\partial b_{3s}} \\ \frac{\partial U_2}{\partial a_1} \dots \frac{\partial U_2}{\partial a_r} & \frac{\partial U_2}{\partial b_{11}} \dots \frac{\partial U_2}{\partial b_{1s}} & \frac{\partial U_2}{\partial b_{21}} \dots \frac{\partial U_2}{\partial b_{2s}} & \frac{\partial U_2}{\partial b_{31}} \dots \frac{\partial U_2}{\partial b_{3s}} \end{pmatrix}$$

Eq. 2.33

I due valori stimati per U possono essere combinati in un singolo valore attraverso il metodo dei moltiplicatori di Lagrange in Eq. 2.34.

$$U = \lambda U_1 + (1 - \lambda)U_2$$

Eq. 2.34

dove

$$\lambda = \frac{v_{22} - v_{12}}{v_{11} + v_{22} - 2v_{12}}$$

Eq. 2.35

e

$$\sigma(U) = \sqrt{\frac{v_{11}v_{22} - v_{12}^2}{v_{11} + v_{22} - 2v_{12}}}$$

Eq. 2.36

Infine in letteratura (Jiménez, Madsen e Andersen, 2008), (Ljung 1999), (Bloem, 1994), (Bloem, Norlén, et al. 1996) sono esposti i seguenti criteri che deve avere il modello per la validazione dello stesso.

- Fitting sui dati: i residui del modello devono essere ‘piccoli’ e in forma di processo di rumore bianco. Una condizione per il rumore bianco è che non ci sia autocorrelazione nei residui o correlazione tra residui e variabili di input;
- Validità interna: il modello deve essere in accordo con altri dati rispetto a quelli utilizzati per la sola stima dei parametri;
- Validità esterna: il risultato del modello non deve essere in conflitto con precedenti condizioni o altre condizioni note;

- Stabilità dinamica: a partire da condizioni stazionarie, il modello deve fornire un output in corrispondenza di una variazione temporanea in una variabile di input che gradualmente si attenua (solo se il modello deve descrivere caratteristiche dinamiche);
- Identificabilità: deve essere possibile determinare i parametri del modello unicamente dai dati;
- Semplicità: il modello deve essere il più semplice possibile.

Per una descrizione più dettagliata dei metodi di Black Box si rimanda a (Ljung 1999).

2.2.4 Il Metodo dell'analogia elettrica, il software LORD

Si riporta, qui di seguito, una breve descrizione del software LORD (Gutschker, 2004), (Gutschker, 2008). Tale software è uno strumento sviluppato nel progetto PASLINK, (Bloem, 1994) e (Bloem, Norlén, et al. 1996), che implementa la modellazione di reti RC_e secondo l'analogia elettrica. Esso segue un approccio dinamico all'analisi dei dati che permette di identificare i parametri U e g dopo aver valutato i parametri del sistema termico. Nel semplice caso di un elemento monostrato il bilancio termico può essere applicato come da Eq. 2.37.

$$\frac{\delta T}{\delta \tau} = \alpha \frac{\delta^2 T}{\delta x^2}$$

Eq. 2.37

La relazione in Eq. 2.37 permette di calcolare il campo di temperature funzione del tempo all'interno del componente quando siano note le condizioni al contorno (serie di temperature superficiali su entrambi i lati dell'elemento) e le condizioni iniziali (campo di temperatura all'interno dell'elemento all'istante iniziale). Tale campo di temperatura è continuo, e l'accumulo ed il passaggio di calore si verificano su ciascun punto del componente, ma per l'analisi si considera una discretizzazione in un certo numero di nodi. Ciascuno di questi nodi è interessato da una sua progressione di temperatura ed una certa capacità termica (anche la capacità termica del muro è discretizzata). Lo strumento LORD prende in considerazione anche l'effetto di fonti di calore addizionali quali la radiazione solare, ma per i casi considerati nelle analisi si sono trattate solo configurazioni di elementi non esposti e senza ulteriori sorgenti di

calore. L'approccio generale per l'analisi è il seguente: sono imposti al modello i dati registrati di temperatura superficiale lato interno ed esterno, ed il flusso termico lato interno, ovvero le progressioni ai nodi interno ed esterno. Uno di questi nodi è scelto come nodo di output: il software calcola la serie di temperatura (o di flusso termico specifico) in corrispondenza di questo ed esegue il confronto con i dati misurati per raggiungere la miglior conformità tra le due serie attraverso la variazione dei valori dei parametri del modello. Inoltre il software calcola la progressione della temperatura ai nodi interni. Per chiarire quanto ora affermato si espone il semplice esempio di un elemento di involucro: esso può essere modellato con una semplice rete RC_e (Fig. 2.2.2): i nodi estremi sono N1 e N4, ed in corrispondenza di questi nodi le temperature sono misurate. Il programma procede con il calcolo delle temperature in ciascuno dei nodi: come dati di output sono state adottate le temperature superficiali interne in quanto queste sono meno soggette a disturbi, oppure il flusso termico specifico lato interno.

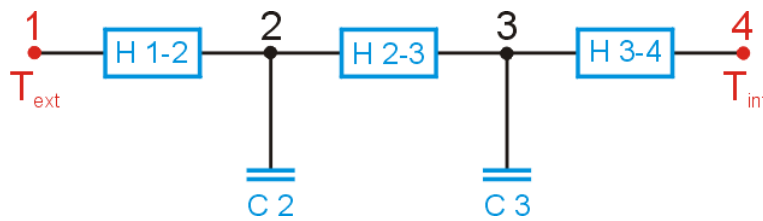


Fig. 2.2.2: esempio di rete elettrica da associare ad un sistema parete, fonte: (Gutschker, 2004)

Dall'identificazione dei parametri sono noti i valori delle tre conduttanze (H1, H2 ed H3) e dunque può essere calcolata la conduttanza termica da Eq. 2.38.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{H1} + \frac{1}{H2} + \frac{1}{H3}$$

Eq. 2.38

Invece delle temperature superficiali sarebbe possibile utilizzare le temperature dell'aria in entrambi i lati del muro e collegare queste temperature ai nodi esterni mediante le resistenze superficiali per ottenere, anziché il valore della conduttanza C, quello della trasmittanza U.

Per ogni nodo del modello può essere impostato un bilancio dei flussi entranti ed uscenti, ottenendo così un sistema di equazioni differenziali per ogni nodo, dove per l'*i*-esimo nodo vale il bilancio Eq. 2.39:

$$\frac{dT_i}{dt} \cdot C_{ei} = (T_i - T_{i-1}) \cdot \frac{1}{R_{(i-1,i)}} + (T_i - T_{(i+1)}) \cdot \frac{1}{R_{(i,i+1)}}$$

Eq. 2.39

E passando alla notazione in forma matriciale di Eq. 2.40:

$$[\Theta] = [A] \cdot [\Theta_{old}] + (B)$$

Eq. 2.40

La soluzione del sistema di equazioni differenziali si ottiene numericamente attraverso l'approssimazione di Eq. 2.41.

$$\frac{dT_i}{d\tau} \rightarrow \frac{\Delta T_i}{\Delta \tau}$$

Eq. 2.41

Il software esegue la minimizzazione di Eq. 2.42 per ottenere l'ottimizzazione del vettore dei parametri; ovvero, i valori dei parametri sono scelti per raggiungere il minimo della funzione V(Par).

$$V = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum (\Theta_{measured} - \Theta_{calculated})^2}$$

Eq. 2.42

N: numero di data points misurati

La minimizzazione della funzione V(Par) è la parte critica dell'analisi poiché essa è affetta da rumore e, generalmente, presenta una serie di minimi locali oltre al minimo globale. La forma dell'area multi-dimensionale di V(Par) dipende dal modello usato, dal numero di parametri e dalla qualità dei dati misurati. Non è possibile stabilire con certezza se il minimo individuato sia globale o locale: in Fig. 2.2.3 sono riportati due esempi per l'area associata a V(Par) in due situazioni estreme. La Fig. 2.2.3.A riporta un'area liscia, dunque l'algoritmo di calcolo dovrebbe individuare il minimo globale in breve tempo, mentre la Fig. 2.2.3.B mostra un'area

caratterizzata da una serie di minimi locali, per cui vi è necessità di impostare l'analisi diverse volte con valori iniziali differenti.

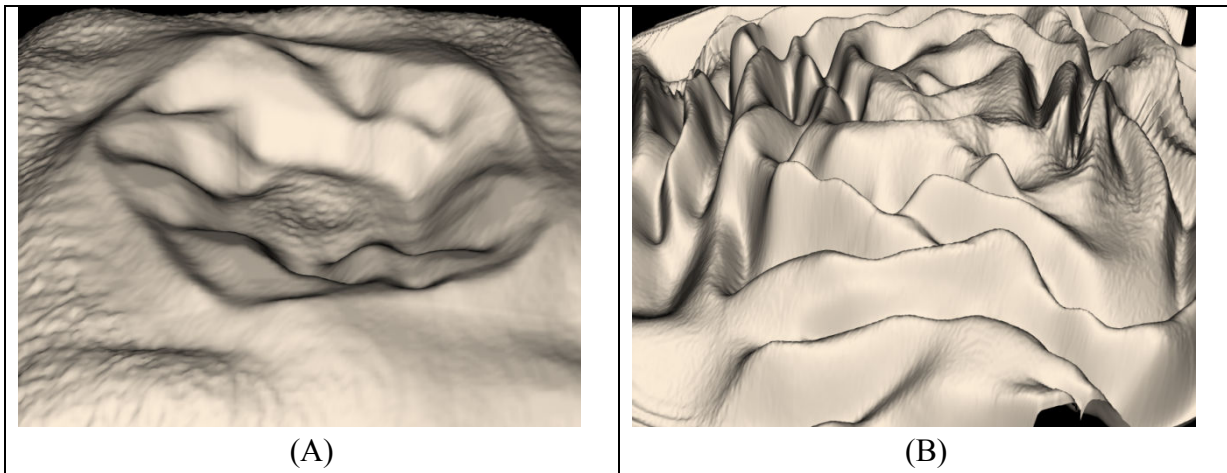


Fig. 2.2.3: esempi di superficie associata a $V(\text{Par})$, fonte: Gutschker, 2004 e 2008.

Il software LORD implementa due differenti procedure per la minimizzazione; quella del semplice di Downhill e il metodo di Monte Carlo. Per una analisi approfondita dei metodi si rimanda a (Gutschker, 2004). Inoltre il software fornisce anche la possibilità di considerare la presenza del rumore o di eventuali disturbi dei dati misurati come in (Gutschker, 2004).

Al termine dell'analisi il valore di conduttanza è presentato come risultato secondo il bilancio di Eq. 2.38.

2.3 Analisi teorica e sperimentale della strumentazione di misura

La strumentazione di misura è composta da una piastra termoflussimetrica (HFM), da quattro termocoppie e dal sistema di acquisizione. L'HFM utilizzato ha una superficie di 250 x 250 mm², 1.5 mm di spessore e la termopila annegata in uno strato di resina epossidica. La sua resistenza termica è stimata, secondo quanto riportato dal costruttore in (ALMEMO 2005) e fonti di letteratura (Perino 2005), nell'intervallo 0.05~0.075 m²·K·W⁻¹. Le termocoppie, di lunghezza pari a 5 m, sono di tipo (T) (Cu-CuNi), con ice-point compensato elettronicamente. Ulteriori dettagli sul sistema di misura sono disponibili nel manuale del costruttore (ALMEMO 2005): un'incertezza del 5% sul valore letto riferita ad una distribuzione uniforme è stata considerata per misure di flusso termico, mentre un'incertezza di 0.4 K in riferimento ad una distribuzione uniforme è stata assunta per misure di temperatura seguendo i criteri espressi nella guida ISO (ISO GUIDE 1995).

2.3.1 La misura di flusso termico specifico

Una fase di prova preliminare è stata predisposta presso il laboratorio dell'ITC-CNR di Padova sul flussimetro: la piastra è stata posizionata su un materiale isolante con caratteristiche termiche e spessore noti (Fig. 2.3.1), dunque il suo valore di conduttanza è noto. Le caratteristiche del pannello di prova sono state $\lambda_{\text{panel}} = 0.031 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $S_{\text{panel}} = 0.03 \text{ m}$, e le sue dimensioni di 0.8 m in altezza, 0.6 m in ampiezza. Il valore teorico di conduttanza è dunque pari a $1.033 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Le condizioni al contorno ed i grafici relativi ai risultati dell'analisi sono riportati in Fig. 2.3.2.

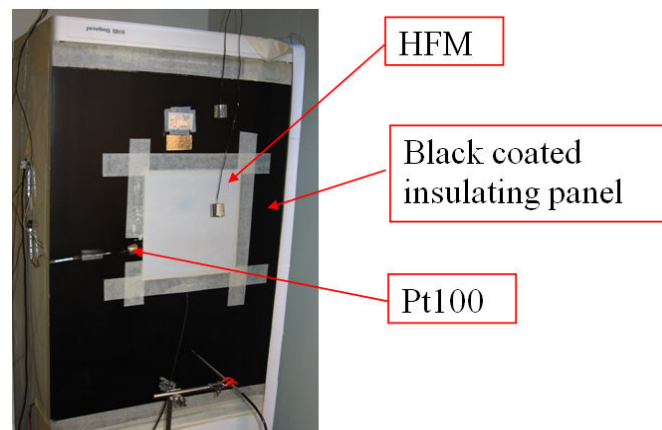
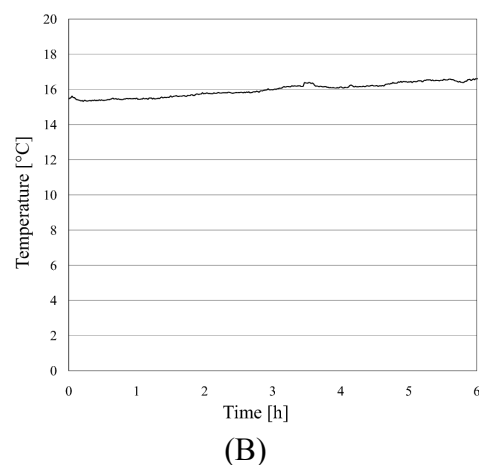
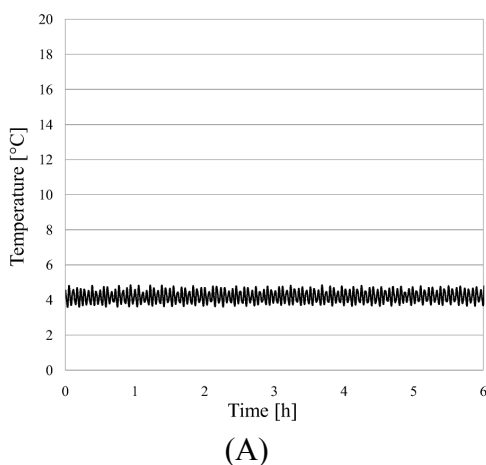


Fig. 2.3.1: apparato sperimentale di misura dell'ITC-CNR di Padova.

Il pannello isolante è stato montato sull'apertura di un refrigeratore commerciale per poter mantenere il lato freddo interno ad una temperatura costante di 4.2°C , con una stabilità di $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ durante il test (Fig. 2.3.2.A). In corrispondenza del lato caldo esterno, la temperatura dell'aria ha determinato la sollecitazione termica (Fig. 2.3.2.B); entrambe le serie di temperatura sono state registrate. I dati sono stati campionati istantaneamente con l'intervallo di 1 minuto, mentre l'intera durata della prova è stata di 6 h. In questo modo il flusso termico specifico risultante dal bilancio termico di Eq. 2.43 è stato confrontato con il flusso termico specifico rilevato dal flussimetro.



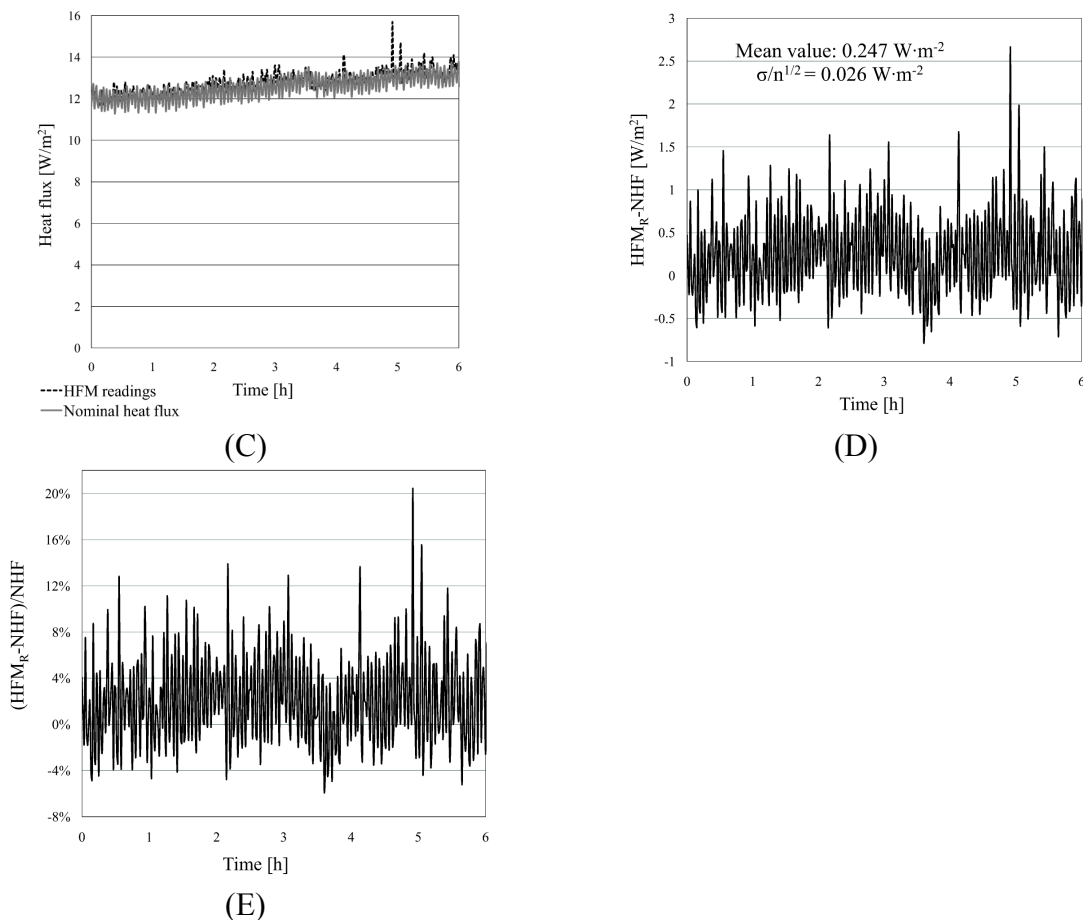


Fig. 2.3.2: condizioni al contorno e risultati della prova effettuata sul HFM: (A) temperatura della superficie fredda, (B) temperatura della superficie calda, (C) flusso termico specifico rilevato dal HFM e flusso specifico nominale, (D) scarto assoluto tra valore letto e flusso nominale, (E) variazione relativa tra flusso letto e nominale in relazione al flusso nominale.

$$q_{\text{nom}} = (\lambda_{\text{panel}}/s_{\text{panel}}) \cdot (t_i - t_e)$$

Eq. 2.43

Sebbene le condizioni ottimali di prova, ovvero sollecitazione in regime stazionario e equilibrio del flusso termico scambiato per radiazione non siano state raggiunte pienamente, la variazione media delle letture di flusso termico in relazione a quelle nominali è inferiore al valore dichiarato dal produttore.

2.3.2 La misura di temperatura

Le quattro termocoppie sono state testate presso il laboratorio del DFT dell'Università di Padova. Il confronto è stato effettuato con una Pt100 di incertezza dichiarata pari a ± 0.02 °C ed un livello di confidenza del 95% (ISO GUIDE 1995). Attraverso un bagno termostatico, si sono acquisiti tre punti di misura a tre differenti valori di temperatura rappresentativi delle condizioni in situ. Dopo il raggiungimento del regime stazionario, un set idoneo di valori è stato acquisito e confrontato con i valori ottenuti con la sonda di riferimento. I risultati sono riportati in Tab. 2.1.

	Punto 1			Punto 2			Punto 3		
	Valor medio [°C]	$\sigma/n^{1/2}$ [°C]	Dev. ¹ [°C]	Valor medio [°C]	$\sigma/n^{1/2}$ [°C]	Dev. ¹ [°C]	Valor medio [°C]	$\sigma/n^{1/2}$ [°C]	Dev. ¹ [°C]
Pt100	19.70	0.00	-	14.70	0.00	-	9.71	0.00	-
TC 1	19.80	0.02	0.10	14.80	0.04	0.10	9.76	0.06	0.05
TC 2	19.62	0.01	-0.08	14.66	0.02	-0.04	9.56	0.02	-0.15
TC 3	19.58	0.02	-0.12	14.62	0.02	-0.08	9.58	0.02	-0.13
TC 4	19.52	0.01	-0.18	14.60	0.00	-0.10	9.54	0.02	-0.17

¹ Scostamento tra i valori letti dalla sonda testata e la Pt100 di riferimento.

Tab. 2.1: risultati della prova di taratura delle termocoppie.

Dall'esame dei risultati in Tab. 2.1 è possibile ipotizzare, nell'ipotesi peggiore, uno scostamento delle letture rispetto alla sonda di riferimento di 0.20°C.

2.4 La misura teorica di conduttanza attraverso simulazioni FEM

Poiché il risultato della misura di conduttanza è basato su un metodo di post-processing, una volta che si è descritta l'accuratezza dell'apparato sperimentale, è importante indagare l'effetto della sensibilità dei metodi di post-processing a differenti condizioni meteorologiche, così come la perturbazione dovuta alla presenza del flussimetro. Per quanto riguarda la prima delle due questioni ora menzionate, si sono analizzate le performance dei più comuni metodi di analisi attraverso differenti set di dati di input; in particolare si sono considerati dati rispettivamente non affetti (denominati T1) ed affetti (T2) da una non trascurabile caduta di temperatura. Per quanto riguarda la presenza del flussimetro, si è approfondito e sviluppato quanto già presente in

letteratura (Trethowen 1986). Le analisi qui descritte sono state eseguite con il Metodo degli Elementi Finiti (FEM) implementato dal software COMSOL Multiphysics (COMSOL 2008).

2.4.1 L'effetto del regime dinamico nei dati di input

Il modello riportato in Fig. 2.4.1, corrispondente ad una struttura reale, è stato implementato nell'analisi FEM. Il flussimetro è stato posizionato centralmente sulla superficie interna. Per rappresentare il caso di una non perfetta adesione dell'HFM sulla superficie interna, ipotesi effettivamente possibile, si è considerata la presenza di uno strato di aria di spessore medio di 1 mm al disotto della piastra, perciò la resistenza termica dell'HFM simulato comprende la piastra e lo strato di aria. A partire dai già citati dati dichiarati dal costruttore e disponibili in letteratura (ALMEMO 2005) e (Perino 2005), le proprietà imposte dell'HFM sono state $\lambda_{eq} = 0.021 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $s_{eq} = 2.5 \text{ mm}$, $\rho = 800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_p = 860 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

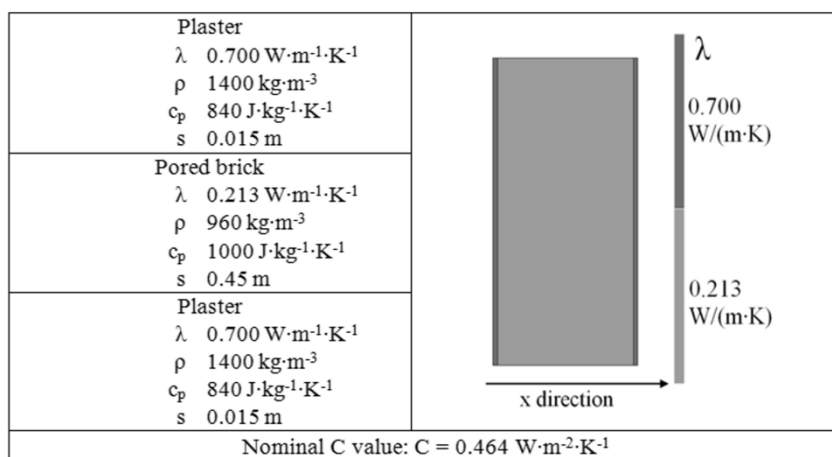


Fig. 2.4.1: caratteristiche del modello implementate nell'analisi.

Le serie di dati di temperatura superficiale esterna e aria dell'ambiente interno che sono state imposte all'elemento dell'involucro sono riportate in Fig. 2.4.2.A e Fig. 2.4.2.B. In tal modo, in entrambi i casi si sono ottenuti gli andamenti dei dati di input di temperature superficiali interne e flusso termico attraverso le simulazioni FEM, successivamente implementati con la serie di dati di temperatura superficiale esterna rilevata mediante i metodi di post-processing. Come già menzionato, i metodi utilizzati sono stati quello delle Medie Progressive (ISO 9869:1994) e (Bloem, 1994), della Media Finestrata (Bloem, 1994), di Black Box utilizzando il MATLAB

IDENT toolbox come in (Jiménez, Madsen e Andersen, 2008), e la metodologia adottata nel software LORD (Gutschker, 2004 e 2008).

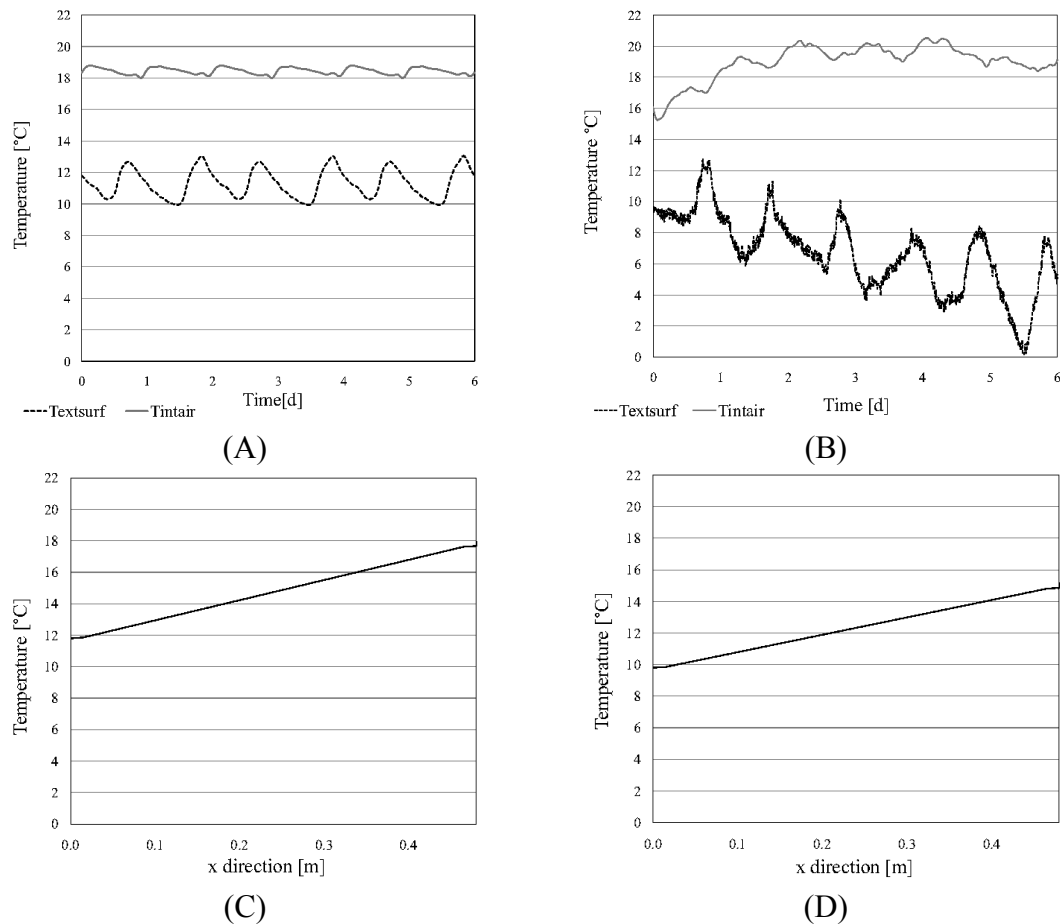


Fig. 2.4.2: condizioni al contorno delle simulazioni, (A) serie di temperatura superficiale esterna e aria dell'ambiente interno per le simulazioni T1, (B) serie di temperatura superficiale esterna e aria dell'ambiente interno per le simulazioni T2, (C) campo di temperatura all'interno dell'elemento all'istante iniziale per le simulazioni T1, (D) campo di temperatura all'interno dell'elemento all'istante iniziale per le simulazioni T2.

Le condizioni al contorno di Fig. 2.4.2.A e Fig. 2.4.2.B sono state applicate allo stesso elemento; in Fig. 2.4.2.C e Fig. 2.4.2.D sono riportati i profili di temperature all'istante iniziale all'interno degli elementi per i casi T1 e T2. I profili di temperatura esterna sono derivati da misure in opera, mentre il profilo di temperatura dell'aria dell'ambiente interno è stato ottenuto attraverso il bilancio di Eq. 2.44 a partire dalla temperatura interna (realmente misurata) t_i e approssimando il flusso interno specifico q_0 con q_i rilevato in opera.

$$t_r \approx q_i/h_i + t_i$$

Eq. 2.44

Il coefficiente di scambio globale h_i è stato considerato costante e pari a $7.27 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ secondo quanto riportato in (Khalifa e Marshall 1990). In questo modo si sono approssimate le condizioni che rappresentano una misura in opera reale. I risultati delle simulazioni sono riportati in Fig. 2.4.3 per le simulazioni T1 e in Fig. 2.4.4 per le simulazioni T2.

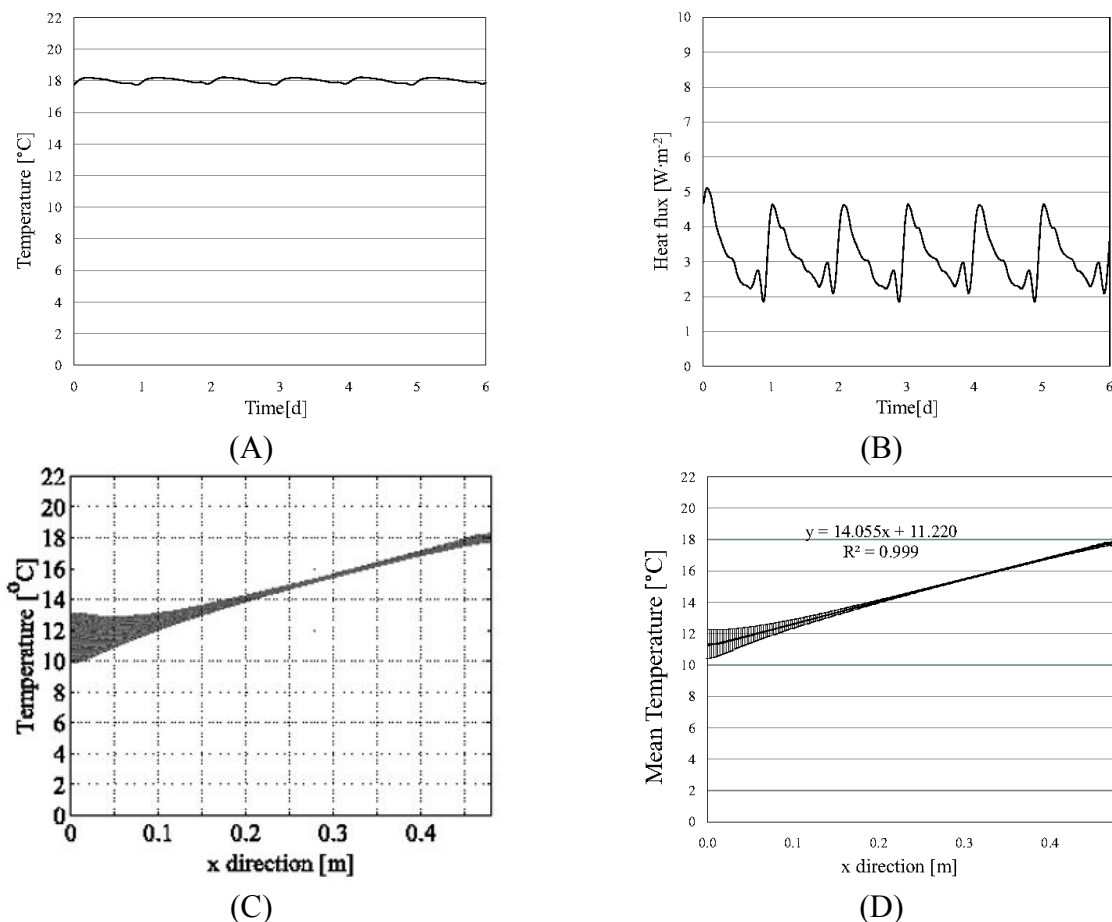


Fig. 2.4.3: risultati nel caso T1, (A) profilo della temperatura superficiale interna, (B) flusso termico specifico in corrispondenza della superficie indisturbata, (C) profilo di temperatura all'interno dell'elemento in direzione x nell'intera durata della simulazione, (D) profilo medio della temperatura (con deviazione standard) all'interno dell'elemento in direzione x nell'intera durata della simulazione.

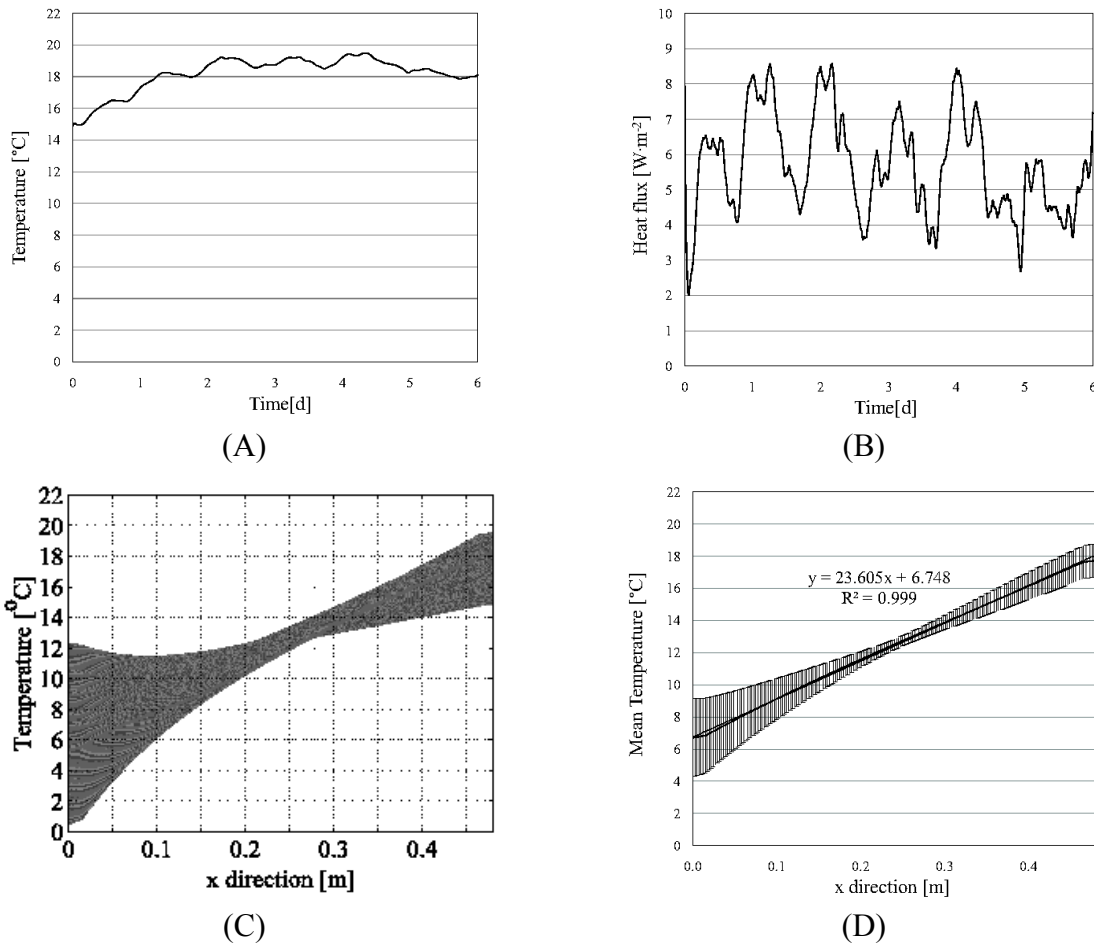


Fig. 2.4.4: risultati nel caso T2, (A) profilo della temperatura superficiale interna, (B) flusso termico specifico in corrispondenza della superficie indisturbata, (C) profilo di temperatura all'interno dell'elemento in direzione x nell'intera durata della simulazione, (D) profilo medio della temperatura (con deviazione standard) all'interno dell'elemento in direzione x nell'intera durata della simulazione.

Le Fig. 2.4.3.D e Fig. 2.4.4.D mostrano il valore medio e la banda di deviazione standard della temperatura nella sezione del componente. In entrambi i casi il profilo medio sembra essere approssimato da una retta la cui pendenza è riportata sulla curva. Il semplice controllo sulla conducibilità media equivalente del componente può essere impostato secondo Eq. 2.45

$$\bar{\lambda}_{eq} = \frac{\bar{q}_0}{\Delta t} \cdot s_{eq} = \frac{\bar{q}_0}{S}$$

Eq. 2.45

dove S è la pendenza del profilo medio. Il valore medio del flusso specifico \bar{q}_0 in Fig. 2.4.3.B (simulazioni T1) è pari a $3.13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; $\bar{\lambda}_{eq}$ risultante è pari a $0.223 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ per cui il valore di C è pari a $0.464 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, corrispondente a quello nominale. Lo stesso controllo è stato applicato alle simulazioni T2 di Fig. 2.4.4, in cui il valore medio di flusso specifico è pari a $5.69 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e $\bar{\lambda}_{eq}$ risulta di $0.241 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, che corrisponde ad una valore di C di $0.502 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ con un aumento relativo dell'8% rispetto al valore nominale.

Le simulazioni sono state impostate anche introducendo il termine di rumore nei dati di input, coerentemente con le informazioni sull'incertezza esposte in 2.3; in tal modo si sono riprodotti dati effettivamente registrati dal sistema di acquisizione. A titolo di esempio si riportano i dati per il caso T1 affetti da rumore in Fig. 2.4.5 (si vedano le Fig. 2.4.2.A, Fig. 2.4.3.A, Fig. 2.4.4.B per un confronto sui dati di input).

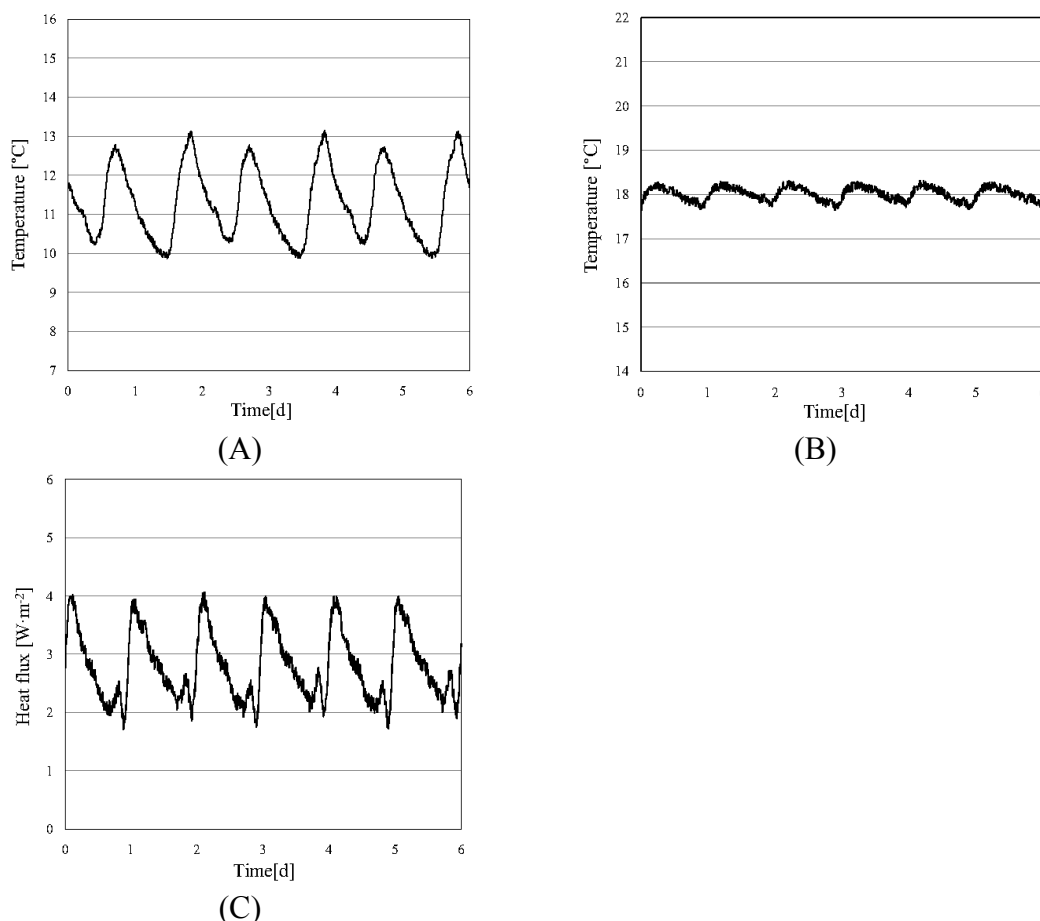


Fig. 2.4.5: dati affetti da rumore per le simulazioni T1, (A) profilo della temperatura superficiale esterna affetta da rumore, (B) profilo della temperatura superficiale esterna affetta da rumore, (C) profilo del flusso termico affetto da rumore in corrispondenza della superficie del flussimetro.

I vari metodi di post-processing presenti in letteratura sono stati poi implementati usando i profili di temperatura superficiale esterna misurata, ed i profili di temperatura superficiale interna e flusso termico specifico risultanti dalle simulazioni: i dati di input utilizzati, come precedentemente specificato, sono stati sia quelli nominali che quelli affetti da rumore. Mediante le simulazioni FEM il valore nominale di conduttanza è noto, perciò si sono valutati gli scostamenti tra i risultati ottenuti con i differenti metodi ed il valore nominale. Per quanto riguarda il metodo di Black Box, si sono seguiti due differenti approcci con il software MATLAB: il primo utilizza tutti i dati per la validazione, il secondo solo l'ultimo terzo. In ciascun caso si è scelto il modello di best fitting come riportato in (Jiménez, Madsen e Andersen, 2008). In Tab. 2.2 e Tab. 2.3 sono riportati i risultati delle analisi ottenuti implementando come flusso termico specifico, il solo flusso indisturbato q_0 (dunque non si considera la presenza del flussimetro).

$C_{nom}=0.464 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	C_{AM}^1 [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{DAM}^2 [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^* [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^{**} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDt} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDq} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
q_0 , dati nominali	0.467	0.466	0.461	0.465	0.465	0.464
% Dev. NV	+0.7%	+0.4%	-0.7%	+0.2%	+0.2%	0.0%
q_0 , dati affetti da rumore	0.467	0.466	0.461	0.461	0.465	0.464
% Dev. NV	+0.7%	+0.4%	-0.7%	-0.7%	+0.2%	0.0%

*Validazione ottenuta con tutti i dati, modello di best fitting
 **Ultimo terzo dei dati per la validazione, modello di best fitting
¹Il risultato si riferisce all'ultimo valore della simulazione, l'oscillazione del risultato attorno al valore medio è secondo quanto riportato in ISO 9869
²Il risultato si riferisce al valore medio del giorno centrale della simulazione.

Tab. 2.2: risultati dell'applicazione dei vari metodi di post-processing alle simulazioni T1.

$C_{nom}=0.464 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	C_{AM}^1 [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{DAM}^2 [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^* [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^{**} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDt} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDq} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
q_0 , nominal clean data	0.496 ¹	0.438	0.474	0.434	0.432	0.431
% Dev. NV	+6.9%	-5.6%	+2.2%	-6.5%	-6.9%	-7.1%
q_0 , noise affected data	0.496 ¹	0.439	0.454	0.425	0.583	0.430
% Dev. NV	+6.9%	-5.4%	-2.2%	-8.4%	+25.7%	-7.3%
*Validazione ottenuta con tutti i dati, modello di best fitting						
**Ultimo terzo dei dati per la validazione, modello di best fitting						
¹ Il risultato si riferisce all'ultimo valore della simulazione, i test di ISO 9869 non sono rispettati						
² Il risultato si riferisce al valore medio del giorno centrale della simulazione.						

Tab. 2.3: risultati dell'applicazione dei vari metodi di post-processing alle simulazioni T2.

Dall'esame delle Tab. 2.2 e Tab. 2.3 si evince come la caduta di temperatura nei dati di input introduca un'incertezza sul risultato finale. Inoltre, si può osservare come il Metodo delle Medie Progressive non sia adatto nel caso T2, infatti i test previsti in ISO 9869:1994 non sono rispettati; le curve che mostrano il risultato per le analisi sono riportate in Fig. 2.4.6.A e Fig. 2.4.6.B. Per quanto riguarda il Metodo della Media Finestrata, sembra che nonostante la presenza di un trend nei dati di input, il risultato dell'analisi raggiunga una certa stabilità in corrispondenza del giorno centrale di simulazione (Fig. 2.4.6.C e Fig. 2.4.6.D).

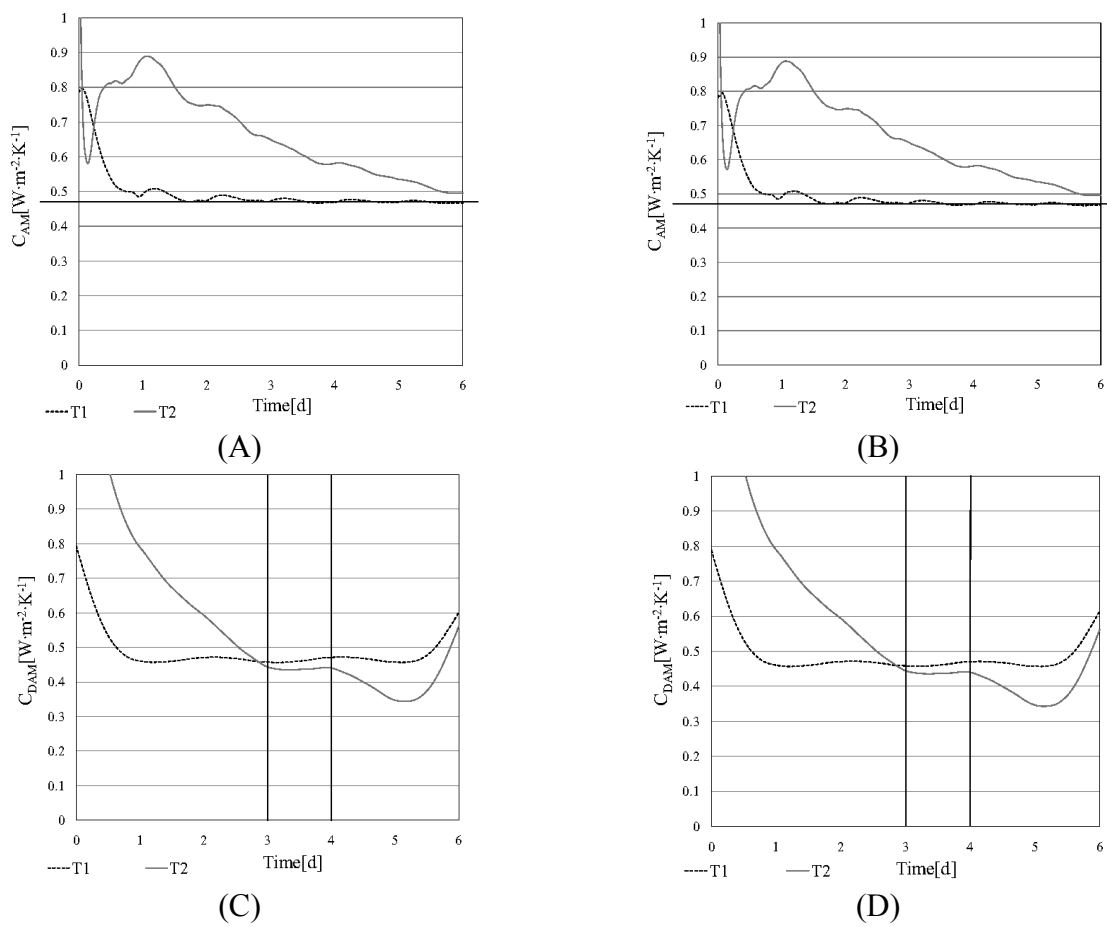


Fig. 2.4.6: risultati dell'analisi con i metodi delle Medie Progressive e Finestrata, (A) curve di C_{AM} risultanti per i casi T1 e T2 con i dati nominali di input, (B) curve di C_{AM} risultanti per i casi T1 e T2 con i dati di input affetti da rumore, (C) curve di C_{DAM} risultanti dai casi T1 e T2 con dati nominali, è evidenziato il giorno centrale della simulazione, (D) curve di C_{DAM} risultanti dai casi T1 e T2 con dati affetti da rumore, è evidenziato il giorno centrale della simulazione

2.4.2 La perturbazione del flusso termico dovuta alla presenza del flussimetro

Per valutare i risultati nel considerare q_0 e q_i come flusso specifico nelle simulazioni si è analizzato quanto esposto in (Trethowen 1986). Come analisi preliminare si è valutata la perturbazione del campo termico dovuta alla presenza del flussimetro; in Fig. 2.4.7 tale perturbazione è riportata in termini di distorsione del flusso monodimensionale all'interno del componente, come mostrano le isoterme e i vettori di flusso.

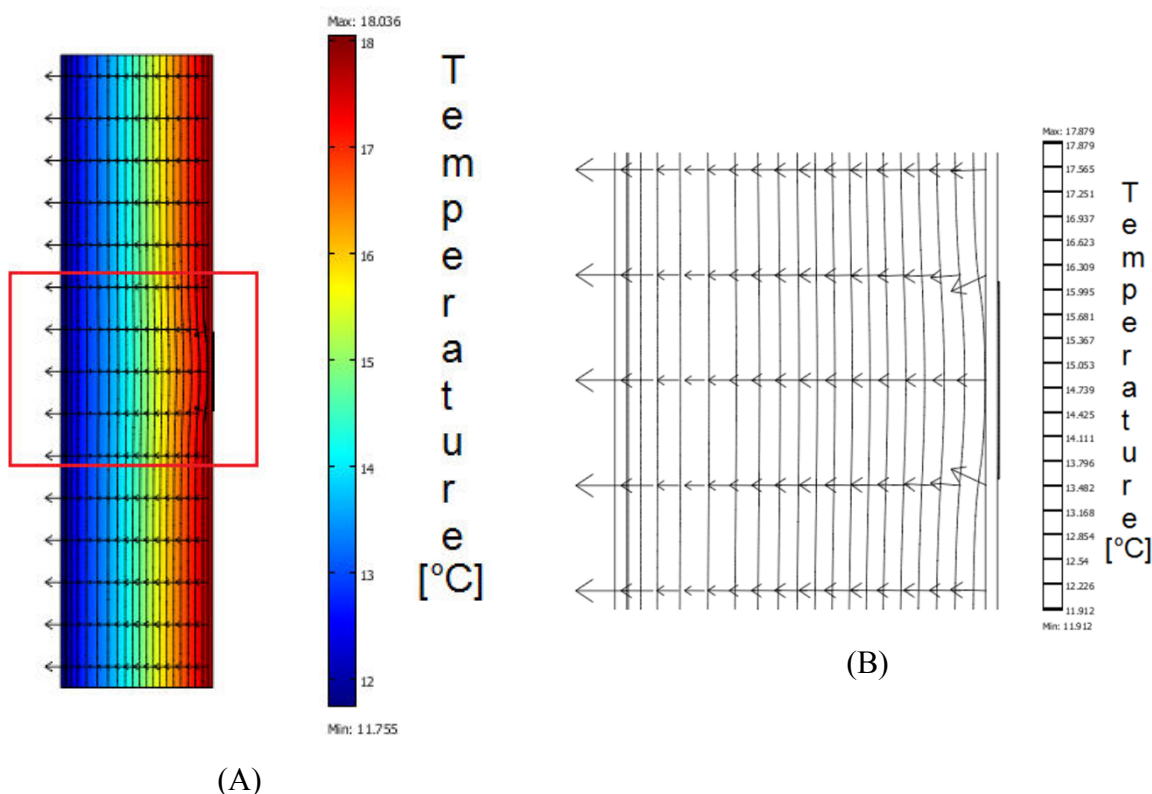


Fig. 2.4.7: risultati delle analisi che mostrano la perturbazione della monodimensionalità del flusso causato dalla presenza del flussimetro sull'elemento di involucro, (A) profilo di temperatura all'interno dell'elemento, (B) isoterme e vettori di flusso sulla sezione perturbata dell'elemento.

Successivamente il rapporto nominale \bar{q}_0/\bar{q}_i è stato considerato secondo l'Eq. 2.46.

$$\frac{\bar{q}_0}{\bar{q}_i} = \frac{R_f}{R_w + R_{hi}} + 1$$

Eq. 2.46

Si è eseguito un confronto tra il valore nominale di \bar{q}_0/\bar{q}_i valutato secondo l'Eq. 2.46, quello risultante dalle simulazioni in presenza del flussimetro reale (q_0/q_i), e quello rilevato da un flussimetro ideale con la stessa dimensione dell'elemento (q_0/q_{i1}); quest'ultimo caso è stato simulato attraverso l'aggiunta di uno strato omogeneo con le stesse caratteristiche del flussimetro installato sulla superficie dell'elemento. Il valor medio nominale del rapporto \bar{q}_0/\bar{q}_i è stato valutato dall'Eq. 2.46 assumendo che i profili di temperatura della superficie esterna e dell'aria dell'ambiente interno non fossero influenzati dalla presenza del flussimetro, e che i flussi q_0 e q_i fossero monodimensionali. I profili del rapporto q_0/q_i risultanti dalle simulazioni sono riportati in Fig. 2.4.8; i valori medi, incluso quello del caso nominale, sono mostrati in Tab. 2.4.

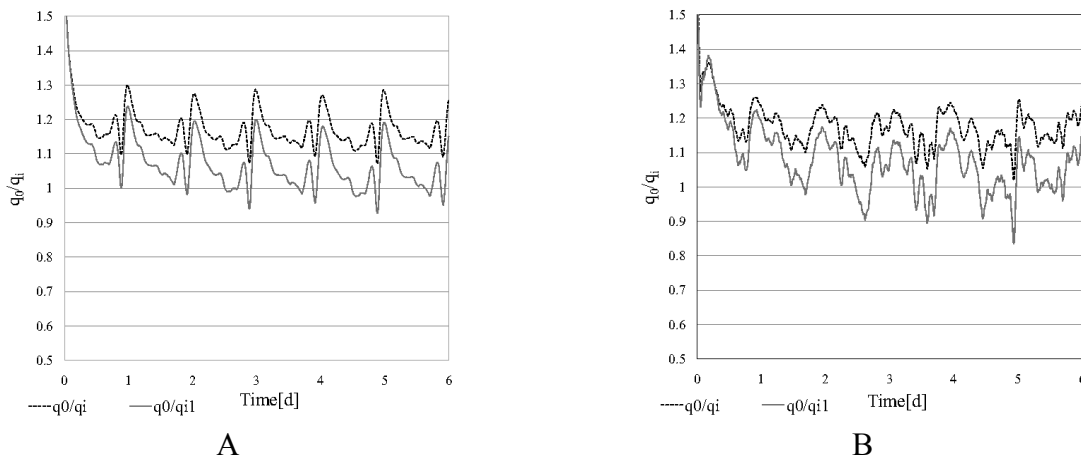


Fig. 2.4.8: diagrammi di q_0/q_i e q_0/q_{i1} , (A) caso T1, (B) caso T2.

Calcolo nominale secondo il bilancio di Eq. 2.46	Valore medio risultante dalle simulazioni T1		Valore medio risultante dalle simulazioni T2	
\bar{q}_0/\bar{q}_i	\bar{q}_0/\bar{q}_i	\bar{q}_0/\bar{q}_{i1}	\bar{q}_0/\bar{q}_i	\bar{q}_0/\bar{q}_{i1}
1.052	1.194	1.052	1.169	1.061

Tab. 2.4: valori medi di \bar{q}_0/\bar{q}_i e \bar{q}_0/\bar{q}_{i1} nei casi analizzati.

Dall'esame del primo valore di Tab. 2.4 è possibile dedurre che il flusso medio specifico scambiato dall'elemento in presenza del flussimetro è teoricamente circa il 5% minore di quello nominale. Nel caso T1, come mostrato in Fig. 2.4.8.A e Tab. 2.4, ciò è confermato considerando un flussimetro idealmente delle stesse dimensioni dell'elemento. Il flussimetro reale causa una diminuzione del flusso medio specifico di circa il 16% per il caso T1 e del 14% per il caso T2. Si sottolinea che questi risultati possono essere dovuti non soltanto alla perturbazione della

monodimensionalità del flusso termico, ma anche da altri fattori quali l'effetto di accumulo dell'intero elemento stesso.

Infine si riportano in Tab. 2.5 e Tab. 2.6 i risultati delle simulazioni ottenute impostando come input il flusso specifico q_i , e quelli delle analisi eseguite impostando la temperatura superficiale del flussimetro anziché quella della superficie interna dell'elemento (in questo caso il riferimento è alla conduttanza che include il flussimetro C'_{nom}). Queste considerazioni riguardano sia il caso di dati nominali che di quelli affetti da rumore.

$C_{nom}=0.464 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ $C'_{nom}=0.442 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	C_{AM}^1 [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{DAM}^2 [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^* [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^{**} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDt} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDq} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
q_i, t_i , dati nominali	0.395	0.398	0.391	0.390	0.399	0.398
% Dev. Valore Nom.	-14.9%	-14.2%	-15.7%	-16.0%	-14.0%	-14.2%
q_i, t_i , dati affetti da rumore	0.395	0.398	0.391	0.392	0.397	0.389
% Dev. Valore Nom.	-14.9%	-14.2%	-15.7%	-15.5%	-14.4%	-16.2%
q_i, t_f , dati nominali	0.383	0.382	0.382	0.380	0.383	0.396
% Dev. Valore Nom.	-13.4%	-13.6%	-13.6%	-14.0%	-13.4%	-10.4%
q_i, t_f , dati affetti da rumore	0.383	0.383	0.382	0.382	0.391	0.383
% Dev. Valore Nom.	-13.4%	-13.4%	-13.6%	-13.6%	-11.5%	-13.4%

*Validazione ottenuta con tutti i dati, modello di best fitting
**Ultimo terzo dei dati per la validazione, modello di best fitting
¹Il risultato si riferisce all'ultimo valore della simulazione, l'oscillazione del risultato attorno al valore medio è secondo quanto riportato in ISO 9869
²Il risultato si riferisce al valore medio del giorno centrale della simulazione.

Tab. 2.5: risultati dell'applicazione dei vari metodi di post processing alle simulazioni T1.

$C_{nom}=0.464 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ $C'_{nom}=0.442 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	C_{AM}^1 [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{DAM}^2 [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^* [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^{**} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDt} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDq} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
q_i, t_i , dati nominali	0.496 ¹	0.375	0.400	0.366	0.530	0.379
% Dev. Valore Nom.	+6.9%	-19.2%	-13.8%	-21.1%	+14.2%	-18.3%
q_i, t_i , dati affetti da rumore	0.496 ¹	0.375	0.383	0.369	0.409	0.428
% Dev. Valore Nom.	+6.9%	-19.2%	-17.5%	-20.5%	-11.9%	-7.7%
q_i, t_f , dati nominali	0.420 ¹	0.371	0.360	0.428	0.399	0.401
% Dev. Valore Nom.	-5.0%	-16.1%	-18.6%	-3.2%	-9.7%	-9.3%
q_i, t_f , dati affetti da rumore	0.420 ¹	0.371	0.364	0.380	0.397	0.389
% Dev. Valore Nom.	-5.0%	-16.1%	-17.7%	-14.0%	-10.2%	-12.0%
*Validazione ottenuta con tutti i dati, modello di best fitting						
**Ultimo terzo dei dati per la validazione, modello di best fitting						
¹ Il risultato si riferisce all'ultimo valore della simulazione, i test di ISO 9869 non sono rispettati						
² Il risultato si riferisce al valore medio del giorno centrale della simulazione.						

Tab. 2.6: risultati dell'applicazione dei vari metodi di post processing alle simulazioni T2.

Dall'analisi delle Tab. 2.5 e Tab. 2.6, si può notare che nel caso T1 il risultato finale può essere leggermente migliorato implementando la temperatura superficiale del flussimetro invece della temperatura superficiale dell'elemento (riferendosi in questo caso a C'_{nom}). Questo miglioramento è maggiormente rilevante per le simulazioni T2 con il Metodo delle Medie Progressive, della Media Finestrata, di Black Box con la validazione dell'ultimo terzo dei dati, e con l'approccio del LORD, mentre il metodo di Black Box con la validazione di tutti i dati causa un peggioramento del risultato finale.

2.5 Gli effetti dell'emissività dell'intonaco e della superficie del flussimetro

Un'ulteriore analisi del presente lavoro è stata la focalizzazione sulla possibile diversità di comportamento alla radiazione tra elemento e flussimetro. Infatti, gli studi presenti in letteratura e le considerazioni riportate finora assumono che l'emissività della superficie del flussimetro sia uguale a quella dell'intonaco interno dell'elemento di involucro. Una differenza di emissività tra intonaco e superficie del flussimetro può causare un differente flusso specifico per radiazione scambiato dal componente indisturbato q_0 confrontato con il flusso registrato dall'HFM q_i . Per le considerazioni valide in questo lavoro l'elemento di involucro ed il flussimetro scambiano calore per radiazione con una superficie equivalente (la quale rappresenta le altre superfici della stanza), e per convezione con l'aria interna. Si considerano per queste analisi solo i dati nominali. La temperatura della superficie equivalente è stata valutata mediante simulazioni TRNSYS (TRNSYS 2000): si è impostato il modello semplice di una stanza assumendo il muro esterno con le stesse caratteristiche dell'elemento simulato (Fig. 2.4.1). Tutte le altre pareti sono state considerate adiacenti a stanze con la stessa temperatura (ovvero condizione di adiabaticità). La temperatura media delle pareti adiabatiche è assunta essere la temperatura della superficie equivalente che scambia per radiazione con l'elemento test ed il flussimetro. Si sono imposte una temperatura di set-point di 20°C per l'aria dell'ambiente interno, e le condizioni esterne del file meteo che riporta il Test Reference Year di Venezia (Mazzarella 1997). Due differenti sistemi di riscaldamento sono stati applicati al sistema, uno convettivo ed uno a pannello radiante a pavimento, per ricavare la differenza nelle temperature superficiali della stanza. Le analisi hanno mostrato che è possibile assumere che la temperatura media delle superfici è di 0.5°C e 0.8°C maggiore della temperatura superficiale interna dell'elemento test, rispettivamente per il caso convettivo e radiante. Nelle simulazioni FEM i profili di temperatura superficiale esterna e di aria dell'ambiente interno sono stati gli stessi dei casi T1 e T2, e si è impostato un coefficiente convettivo pari a $2.25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (Awbi 1998). Per quanto riguarda la radiazione, l'emissività dell'intonaco ε_{IP} è stata assunta pari a 0.75, che è il valore rappresentativo di 8-12 μm di lunghezza d'onda alla temperatura considerata secondo (Avdelidis e Moropoulou 2003). L'emissività della superficie del flussimetro ε_{HFM} è stata variata per riprodurre tre differenti situazioni che possono essere realizzabili in pratica: ε_{HFM} pari a 0.75, 0.90 e 0.50, ovvero rispettivamente uguale a ε_{IP} , maggiore e minore del 20% di ε_{IP} . Per quanto riguarda la temperatura dell'elemento equivalente, entrambi i casi sopra menzionati sono stati implementati,

ovvero temperatura media della superficie equivalente di 0.5°C e 0.8°C superiore rispetto la temperatura della superficie interna dell'elemento t_i . I risultati non mostrano differenze significative tra questi due casi, perciò sono riportati in Tab. 2.7 e Tab. 2.8 solo i risultati per il primo caso (valore medio della temperatura della superficie equivalente maggiore di 0.5°C del valore medio della temperatura superficiale interna dell'elemento test). Tali simulazioni sono denominate T1¹ e T2¹. Sono stati considerati per l'analisi i flussi q_0 e q_i e il profilo di temperatura superficiale interno t_i .

$C_{nom}=0.464$ W·m ⁻² ·K ⁻¹	C_{AM}^1 [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{DAM}^2 [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^* [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^{**} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDt} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDq} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
$\varepsilon_{HFM}=0.75, q_0$	0.464	0.463	0.456	0.461	0.467	0.457
% Dev. NV	+0.0%	-0.2%	-1.7%	-0.7%	+0.7%	-1.5%
$\varepsilon_{HFM}=0.75, q_i$	0.391	0.390	0.389	0.389	0.393	0.394
% Dev. NV	-15.7%	-16.0%	-16.2%	-16.2%	-15.3%	-15.1%
$\varepsilon_{HFM}=0.90, q_0$	0.464	0.463	0.461	0.460	0.469	0.465
% Dev. NV	+0.0%	-0.2%	-0.7%	-0.9%	+1.1%	+0.2%
$\varepsilon_{HFM}=0.90, q_i$	0.394	0.393	0.392	0.391	0.397	0.397
% Dev. NV	-15.1%	-15.3%	-15.5%	-15.7%	-14.4%	-14.4%
$\varepsilon_{HFM}=0.50, q_0$	0.464	0.463	0.462	0.465	0.466	0.467
% Dev. NV	+0.0%	-0.2%	-0.4%	+0.2%	+0.4%	+0.7%
$\varepsilon_{HFM}=0.50, q_i$	0.384	0.383	0.382	0.383	0.391	0.390
% Dev. NV	-17.2%	-17.5%	-17.7%	-17.5%	-15.7%	-16.0%

*Validazione ottenuta con tutti i dati, modello di best fitting
**Ultimo terzo dei dati per la validazione, modello di best fitting
¹Il risultato si riferisce all'ultimo valore della simulazione, l'oscillazione del risultato attorno al valore medio è secondo quanto riportato in ISO 9869
²Il risultato si riferisce al valore medio del giorno centrale della simulazione.

Tab. 2.7: risultati dell'applicazioni di vari metodi di post processing alle simulazioni T1¹ che considerano l'emissività di flussimetro e superficie dell'elemento d'involucro.

$C_{nom}=0.464$ [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{AM} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{DAM}^2 [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^* [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^{**} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDt} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDq} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
$\epsilon_{HFM}=0.75, q_0$	0.465 ¹	0.454	0.450	0.460	0.464	0.463
% Dev. NV	+0.2%	-2.2%	-3.0%	-0.9%	+0.0%	-0.2%
$\epsilon_{HFM}=0.75, q_i$	0.391 ¹	0.382	0.377	0.374	0.381	0.382
% Dev. NV	-15.7%	-17.7%	-18.8%	-19.4%	-17.9%	-17.7%
$\epsilon_{HFM}=0.90, q_0$	0.465 ¹	0.454	0.451	0.457	0.465	0.464
% Dev. NV	+0.2%	-2.2%	-2.8%	-1.5%	+0.2%	+0.0%
$\epsilon_{HFM}=0.90, q_i$	0.393 ¹	0.384	0.379	0.383	0.391	0.388
% Dev. NV	-15.3%	-17.2%	-18.3%	-17.5%	-15.7%	-16.4%
$\epsilon_{HFM}=0.50, q_0$	0.465 ¹	0.454	0.451	0.461	0.465	0.465
% Dev. NV	+0.2%	-2.2%	-2.8%	-0.7%	+0.2%	+0.2%
$\epsilon_{HFM}=0.50, q_i$	0.386 ¹	0.378	0.371	0.344	0.376	0.378
% Dev. NV	-16.8%	-18.5%	-20.0%	-25.9%	-19.0%	-18.5%

*Validazione ottenuta con tutti i dati, modello di best fitting
**Ultimo terzo dei dati per la validazione, modello di best fitting
¹Il risultato si riferisce all'ultimo valore della simulazione, i test di ISO 9869 non sono rispettati
²Il risultato si riferisce al valore medio del giorno centrale della simulazione.

Tab. 2.8: risultati dell'applicazioni di vari metodi di post processing alle simulazioni T2¹ che considerano l'emissività di flussimetro e superficie dell'elemento d'involucro.

2.6 Discussione dei risultati delle analisi FEM

In base ai risultati delle analisi finora discusse si può osservare come la caduta di $1^{\circ}\text{C}/\text{giorno}$ nella temperatura superficiale esterna causi una diminuzione relativa in riferimento al valore nominale nell'intervallo del 2-7% a seconda del metodo utilizzato. Ciò avviene senza considerare la presenza del flussimetro, ma si riferisce al flusso specifico sull'elemento indisturbato q_0 . La presenza del flussimetro, dunque l'implementazione di q_i e di t_i , porta ad una diminuzione relativa massima in riferimento al valore nominale di 14-16% per le simulazioni T1, ovvero con i dati di input non affetti da caduta in temperatura non trascurabile, e raggiunge il picco del 21% per le simulazioni con dati affetti da trend in temperatura. La presenza del rumore associato all'incertezza nei dati misurati, considerando il flusso termico specifico q_0 , non causa variazioni rilevanti nei risultati se comparate con quelle ottenute nel caso di dati nominali; ciò avviene sia per le simulazioni T1 che per le simulazioni T2, con l'eccezione che in quest'ultimo caso l'approccio LORD_t raggiunge il picco di aumento relativo del 26%. La presenza del flussimetro assieme a quella del rumore nei dati rilevati causano una diminuzione relativa con riferimento al valore nominale di 14-16% per il caso T1 e fanno registrare il picco del 20% per il caso T2. L'adozione di t_f invece di t_i , ovvero registrare la temperatura superficiale del flussimetro, genera un miglioramento teorico della diminuzione del valore di conduttanza rispetto al valore nominale; in particolare tale diminuzione oscilla nell'intervallo 10-14% per dati nominali e nell'intervallo 12-14% per i dati affetti da rumore, mentre per il caso T2 essa varia tra il 3-19% per dati nominali e raggiunge il picco del 18% per dati affetti da rumore (i valori dipendono dai metodi utilizzati per il post-processing). Perciò sembra che la presenza del rumore nei dati di input non influenzi i risultati significativamente. Con l'imposizione di differenti emissività per l'intonaco interno e la superficie del flussimetro, e considerando solo i dati nominali, si può registrare un miglioramento del risultato (ovvero la diminuzione del valore di conduttanza rispetto a quello nominale) di circa l'1% per il caso T1¹ se ϵ_{HFM} è maggiore di ϵ_{IP} , mentre si nota un peggioramento di circa il 2% nel caso opposto; per il caso T2¹ queste variazioni raggiungono il 2% e 6% rispettivamente.

Per quanto riguarda i metodi di post-processing, per simulazioni con dati di input non affetti da caduta in temperatura rilevante sembra che tutti i metodi analizzati siano adatti; la variazione relativa di conduttanza in riferimento al valore nominale dipende dal particolare approccio adottato. Per le simulazioni con dati affetti da trend in temperatura sembra possibile affermare

che il Metodo delle Medie Progressive restituisca una curva di conduttanza che non raggiunge stabilità, mentre il Metodo della Media Finestrata sembra fornire in output una curva stabile in corrispondenza del giorno centrale. Nemmeno l'approccio di tipo Black Box sembra adeguato in questo caso, poiché una variazione nei dati per la validazione può portare a una variazione significativa nei risultati; lo strumento più adatto alla valutazione di dati affetti da trend sembra LORD, anche se non è possibile una generalizzazione di tali considerazioni.

Come sviluppi futuri di quest'analisi, la presenza di un trend significativo nei dati di input, la possibilità di registrare la temperatura superficiale del flussimetro invece della temperatura superficiale interna, e una differenza di emissività tra intonaco interno e superficie del flussimetro dovrebbero essere ulteriormente prese in considerazione per un processo di misura reale, e la strumentazione potrebbe, in tal senso, essere migliorata.

2.7 Obiettivi e metodi di una campagna di misure di conduttanza in opera

Durante le stagioni autunno/inverno 2006/2007, 2007/2008, 2008/2009, 2009/2010 si sono eseguite una serie di misure di conduttanza in opera in edifici del Veneto e Friuli Venezia Giulia, secondo i criteri in ISO 9869:1994, che vengono qui di seguito brevemente richiamati.

Si è operato disponendo il posizionamento di quattro termocoppie, due per ogni lato dell'elemento testato, e del termoflussimetro in corrispondenza della superficie interna secondo lo schema in Fig. 2.7.1.

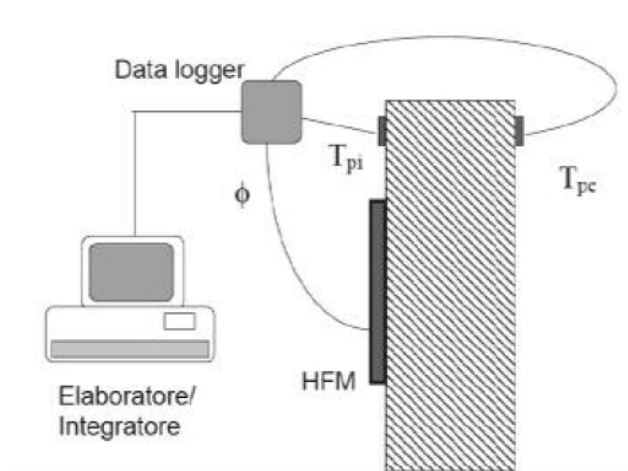
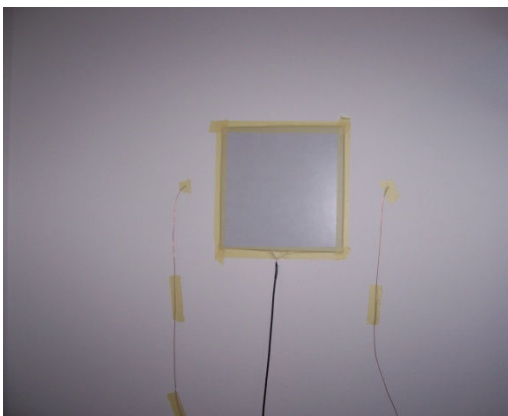


Fig. 2.7.1: modalità secondo cui effettuare la misura di conduttanza in opera, fonte: Anit.

Preventivamente si è effettuata un'analisi della struttura monitorata mediante un accurato esame di piante e sezioni dell'edificio onde evitare di collocare i sensori in corrispondenza di ponti termici (angoli, pilastri, zone in presenza di tubi, crepe ecc..). Le misure sono state effettuate in periodi differenti della stagione autunnale ed invernale, dunque i profili di temperatura di ambienti interno ed esterno sono stati molto diversi fra loro (con i valori più alti di flusso termico specifico rilevati nei mesi invernali). La durata minima delle misure, come previsto in ISO 9869:1994, è stata di 72 h, ma molto spesso i giorni di durata della misura sono stati più di tre; l'intervallo di campionamento è stato impostato pari a 10 minuti, con rilevamento dei valori medi sul ciclo.

Riguardo il posizionamento del termoflussimetro si sono adottati gli accorgimenti qui di seguito esposti, con l'obiettivo di evitare l'introduzione di eventuali resistenze di contatto tra la piastra e l'elemento da analizzare rendendo il sensore il più possibile aderente alla parete. Il

termoflussimetro è stato quindi fissato con nastro adesivo di carta. Il posizionamento della piastra è stato disposto sulla superficie interna della parete onde evitare l'azione degli agenti atmosferici sulla piastra stessa nonché la sua esposizione alla radiazione solare e in maniera tale da evitare zone vicino agli spigoli, pilastri o eventuali altre eterogeneità di composizione della struttura rispetto quella relativa alla parete "corrente" come più sopra precisato. Riguardo le termocoppie, si è cercato di assicurarne la migliore aderenza possibile alla parete mediante l'applicazione del nastro adesivo. Le termocoppie lato interno sono state montate nelle vicinanze del termoflussimetro, quelle lato esterno su pareti non esposte (a Nord o comunque soggette ad elevato ombreggiamento) cercando, laddove possibile, di rispettare la corrispondenza tra posizione dei sensori all'interno e all'esterno. Nel post-processing si è poi utilizzata la media tra questi due valori. Vi è da rimarcare che nella fase del posizionamento del flussimetro e delle termocoppie ci si è avvalsi della collaborazione di un responsabile dell'impresa costruttrice, per l'individuazione dei punti idonei. In Tab. 2.9 sono riassunte le operazioni implementate per eseguire la misura.



(A)



(B)



(C)

Fig. 2.7.2: esempi di installazione della strumentazione per le misure di conduttanza in opera: (A) piastra e termocoppie lato interno, (B) e (C) termocoppie lato esterno.

1. Raccolta ed esame di piante e sezioni delle strutture da testare
2. Stima del valore nominale di conduttanza a partire da relazioni tecniche, certificati, colloqui personali con progettista/responsabile dell'impresa costruttrice
3. Individuazione della disposizione corretta delle sonde e posizionamento dell'apparecchiatura con ausilio del responsabile dell'impresa costruttrice
4. Rilevamento delle serie di dati
5. Post-processing dei dati rilevati

Tab. 2.9: riassunto delle operazioni seguite per effettuare la misura in opera.

Per il calcolo dei valori nominali di conduttanza si è fatto riferimento alla normativa vigente (UNI 10351:1994), (UNI 10355:1994), (EN ISO 10456:2008), (EN ISO 6946:2008): in particolare, per gli edifici per i quali non fossero disponibili informazioni specifiche dei prodotti costituenti la stratigrafia dell'elemento testato si è fatto ricorso ai valori di conducibilità termica di (UNI 10351:1994), laddove invece vi fossero certificati o specifiche di prodotto, si sono utilizzati i dati di conducibilità dichiarata λ_D come esposto in (EN ISO 10456:2008). E' importante sottolineare che ogni misura è stata disposta sotto la presenza del responsabile dell'impresa o del progettista, il quale ha confermato e garantito quanto descritto nella relazione tecnica, ovvero la stratigrafia dell'elemento testato, assunta come valore di progetto con cui confrontare il valore derivante da misura.

Per quanto riguarda l'accuratezza legata al risultato della misura di conduttanza in opera, si evidenzia la complessità del problema. Disposto un adeguato posizionamento della strumentazione sulla parete 'corrente', a determinare l'accuratezza del risultato finale vi sono

diversi fattori, come ampiamente discusso in Sez. 2.4 e seguenti, fra cui i termini legati all'incertezza dello strumento stesso (ovvero le sonde per la misura di temperatura e flusso), al regime dinamico nei dati di input (dunque alla presenza di un trend in temperatura), alla presenza del flussimetro, al metodo di post-processing implementato, alla presenza di eventuali altri disturbi, fluttuazioni etc. Non vi sono ad oggi lavori in letteratura che affrontino in maniera organica il problema, ma l'analisi in Sez. 2.3 e seguenti, sembra indicare che il valore ottenuto con i vari metodi sia inferiore a quello reale. Con riferimento al caso di Sez. 2.4 e seguenti, ovvero C pari a $0.464 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ e trend in temperatura di $1^\circ\text{C}/\text{giorno}$, l'entità di tale scostamento può variare tra il -14% ed il -16% (Tab. 2.5) se i dati di input non sono soggetti a un trend in temperatura non trascurabile, può raggiungere il -21% (Tab. 2.6) se vi è un trend nei dati di input, e considerando anche la situazione sfavorevole di emissività, potrebbe raggiungere il -26%. Per quanto riguarda il campione delle misure, non sempre si verifica un trend in temperatura nei dati di input ed in particolar modo nella temperatura esterna, e laddove tale caduta in temperatura sia presente l'entità di $1^\circ\text{C}/\text{giorno}$ considerata in Sez. 2.4 sembra essere rappresentativa di ciò che si riscontra realmente (tale valore è infatti stato mutuato dai dati di input di uno dei casi misurati riportati in Sez. 2.8). L'emissività del flussimetro non è nota né da informazioni del costruttore, né da prove reali. Inoltre, per quanto riguarda il campione testato di edifici di nuova concezione o riqualificati (si veda l'analisi in Sez. 2.8), il valore medio nominale di conduttanza coincide con quello del caso di riferimento precedentemente richiamato, ovvero $0.464 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, mentre i valori derivanti dall'analisi con i vari metodi si distribuiscono maggiormente nell'intervallo tra $0.3\text{-}0.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, con i valori medi che si attestano tra $0.55\text{-}0.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Dunque il valore considerato per l'analisi in Sez. 2.4 e seguenti, può essere ragionevolmente considerato rappresentativo del valore medio dei valori teorici per le misure in opera su edifici di nuova concezione o riqualificati, per cui nell'ipotesi di nessun trend o di una caduta di temperatura di $1^\circ\text{C}/\text{giorno}$ nei dati di input, possono essere considerati gli intervalli ricavati precedentemente per lo scostamento relativo rispetto al valore medio. In particolare, se si trascura la componente radiativa, ci si può aspettare che tale scostamento, in riferimento al valore di $0.464 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, sia tra il -14% ed il -21%. Tuttavia, non è possibile utilizzare tali intervalli per i singoli elementi costituenti il campione di misure, pertanto nei grafici che seguono non verranno riportate le bande di incertezza.

2.8 Risultati della campagna di misure

In Tab. 2.10 si riporta la descrizione degli edifici testati attraverso la campagna di misure; in particolare si segnalano i casi degli edifici 3, 6, 7. L'edificio del caso 3 è stato sottoposto ad un riempimento dell'intercapedine con fibra di cellulosa; l'intervento ha evidenziato come, a distanza di trent'anni dalla realizzazione dell'edificio stesso, l'isolamento originale nell'intercapedine, un materassino di lana di roccia, fosse completamente deteriorato per cui, di fatto, l'intercapedine, a una certa altezza di piano, risultava d'aria. La misura è stata eseguita prima (ID 3) e dopo l'intervento (ID 29). Per quanto riguarda l'edificio 7, esso è stato riqualificato con un isolamento a cappotto di 10 cm di fibra di legno sul sistema esistente costituito da blocco di laterizio, intercapedine d'aria e laterizio forato, mentre l'edificio 6 è stato riqualificato con il riempimento con fibra di cellulosa di una intercapedine d'aria di spessore medio di 15 cm. Proprio questi ultimi due casi risultano essere, a seguito di misura in opera, i migliori dal punto di vista delle prestazioni di isolamento termico: ciò evidenzia come la misura possa effettivamente fornire una valutazione della corretta esecuzione di quanto predisposto in sede di progetto. In Tab. 2.11 sono riportati i risultati della campagna di misure. Gli edifici sono numerati in ordine crescente in base all'anno, a partire dal più vecchio, e si opera la distinzione tra edifici vecchi, e di nuova concezione e riqualificati, laddove per le unità appartenenti a quest'ultima classe si può ritenere di avere un'accuratezza maggiore relativa al valore di C_{nom} .

ID	Anno	Tipo	Struttura	C_{nom} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
1	1950	V	Mattone Pieno	1.287
2	1976	V	Laterizio + Cappotto	1.283
3	1980	V	Laterizio + Isolamento Intercapedine	0.839
4	1980	V	Laterizio + Isolamento Intercapedine	0.663
5	1990	V	Laterizio	0.694
6	1994	R	Laterizio + Isolamento Intercapedine (Riqualificato)	0.218
7	2003	R	Laterizio + Cappotto (Riqualificato)	0.288
8	2003	N	Laterizio Porizzato	0.549
9	2003	N	Laterizio Porizzato	0.549
10	2003	N	Laterizio Porizzato + Cappotto	0.589
11	2004	N	Laterizio Porizzato	0.549
12	2004	N	Sistema Legno Calcestruzzo + Isolamento integrato	0.405
13	2004	N	Laterizio + Isolamento Intercapedine	0.386
14	2004	N	Laterizio + Sistema Legno Calcestruzzo+Isolamento integrato	0.422
15	2004	N	Laterizio + Isolamento Intercapedine	0.468
16	2004	N	Laterizio Porizzato	0.711
17	2004	N	Laterizio + Cappotto	0.273
18	2005	N	Laterizio Porizzato (impasto con farine di legno)	0.464
19	2005	N	Laterizio Porizzato + Cappotto	0.376
20	2005	N	Laterizio Porizzato (impasto con farine di legno)	0.430
21	2005	N	Laterizio + Isolamento Intercapedine	0.434
22	2006	N	Laterizio Porizzato + Cappotto	0.327
23	2006	N	Laterizio Porizzato + Cappotto	0.659
24	2006	N	Laterizio Porizzato + Cappotto	0.399
25	2006	N	Laterizio + Cappotto	0.557
26	2006	N	Laterizio + Cappotto	0.557
27	2006	N	Laterizio Porizzato	0.742
28	2008	N	Sistema Legno Calcestruzzo + Isolamento integrato	0.340
29	2010	R	Laterizio + Isolamento Intercapedine Riqualificato	0.510

Tipo: N = edificio di nuova concezione, V = edificio di vecchia concezione, R = edificio sottoposto a coibentazione dell'involucro.

Tab. 2.10: descrizione degli edifici testati.

ID	Struttura	C_{nom} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{AM} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{DAM} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^* [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{BB}^{**} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDt} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	C_{LORDq} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
1	MP	1.287	1.320	1.271	1.229	1.338	1.335	1.325
2	L+C	1.283	1.412	1.373	1.294	1.346	1.443	1.430
3	L+II	0.839	1.054	0.970	1.062	0.934	1.019	1.018
4	L+II	0.663	0.986	1.005	0.964	0.926	0.909	0.915
5	L	0.694	0.967	0.948	0.934	0.946	0.981	0.976
6	L+II (R)	0.218	0.290	0.341	0.305	0.347	0.315	0.320
7	L+C (R)	0.288	0.300	0.334	0.295	0.291	0.303	0.308
8	LP	0.549	0.736	0.814	0.763	0.712	0.715	0.720
9	LP	0.549	0.939	1.042	0.846	0.884	0.800	0.780
10	LP+C	0.589	0.980	1.055	0.882	0.929	0.980	0.975
11	LP	0.549	0.656	0.660	0.529	0.580	0.680	0.670
12	Le+Ca+I	0.405	0.467	0.474	0.445	0.440	0.483	0.484
13	L+II	0.386	0.396	0.416	0.396	0.452	0.429	0.420
14	L+Le+Ca+I	0.422	0.548	0.507	0.513	0.509	0.465	0.448
15	L+II	0.468	0.559	0.568	0.539	0.563	0.482	0.496
16	LP	0.711	0.865	0.845	0.818	0.844	0.797	0.803
17	L+C	0.273	0.420	0.453	0.391	0.400	0.433	0.423
18	LP*	0.464	0.599	0.636	0.570	0.608	0.741	0.712
19	LP+C	0.376	0.457	0.400	0.414	0.402	0.443	0.430
20	LP*	0.430	0.548	0.660	0.571	0.602	0.604	0.602
21	L+II	0.434	0.438	0.417	0.408	0.398	0.449	0.425
22	LP+C	0.327	0.452	0.443	0.394	0.444	0.425	0.423
23	LP+C	0.659	0.687	0.482	0.468	0.451	0.717	0.721
24	LP+C	0.399	0.477	0.632	0.453	0.440	0.418	0.386
25	L+C	0.557	0.610	0.570	0.579	0.598	0.637	0.634
26	L+C	0.557	0.622	0.690	0.581	0.592	0.639	0.632
27	LP	0.742	0.942	0.929	0.881	0.882	0.945	0.941
28	Le+Ca	0.340	0.537	0.530	0.498	0.521	0.507	0.507
29	L+II (R)	0.510	0.783	0.762	0.724	0.725	0.731	0.734

MP: Mattone Pieno, L: Laterizio, LP: Laterizio Porizzato, LP*: Laterizio Porizzato (impasto con farine di legno), I: Intercapedine, II: Intercapedine Isolata, C: Cappotto, Le+Ca: Sistema Legno Calcestruzzo, R: edificio sottoposto a coibentazione dell'involucro.

Tab. 2.11: risultati della campagna di misure di conduttanza in opera.

Per alcune unità si sono effettuate due misure, in due diversi periodi dell'anno ed in corrispondenza di punti leggermente diversi: in Fig. 2.8.1 sono riportati i risultati (per queste unità è presentato in Tab. 2.11 il valore medio dei risultati ottenuti con ciascuno dei metodi implementati).

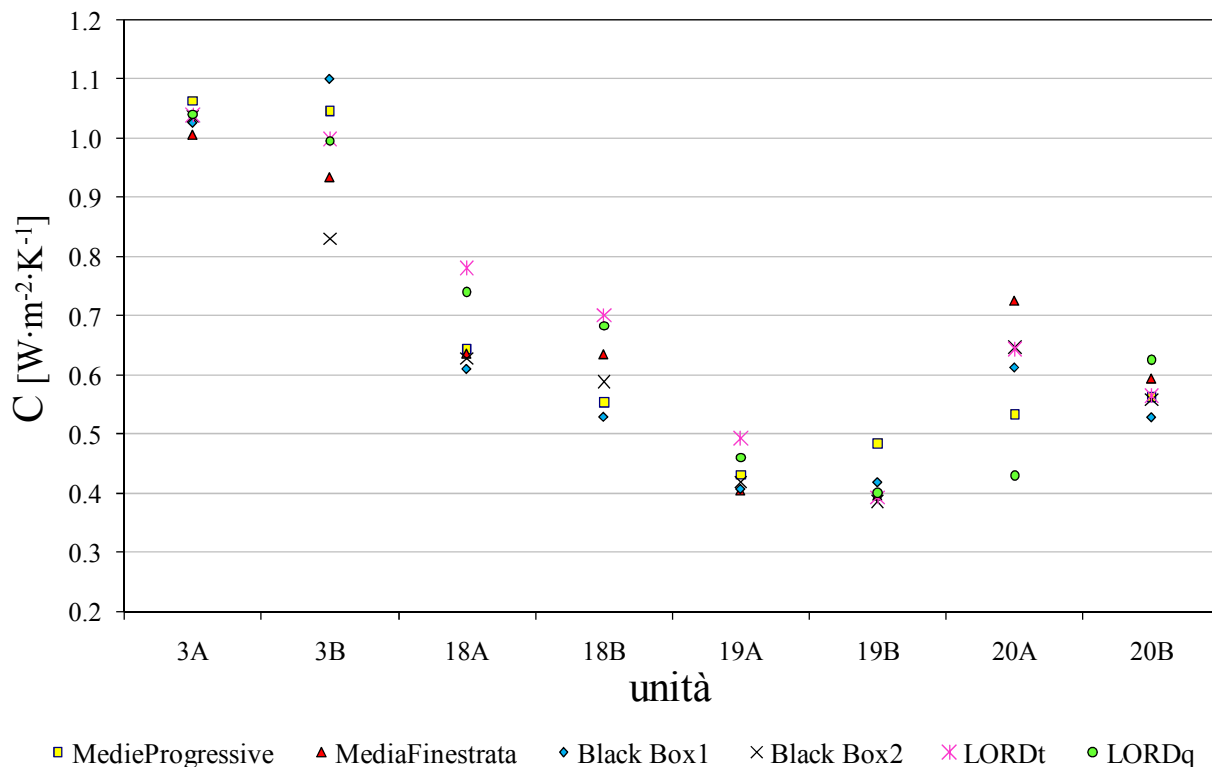


Fig. 2.8.1: risultati delle misure eseguite sulle stesse unità in corrispondenza di posizioni e periodi diversi.

In Fig. 2.8.2 si riportano i risultati di due misure effettuate nella stessa unità, in corrispondenza del medesimo punto e a breve distanza di tempo l'una dall'altra (in Tab. 2.11 è riportato il valore medio delle due misure).

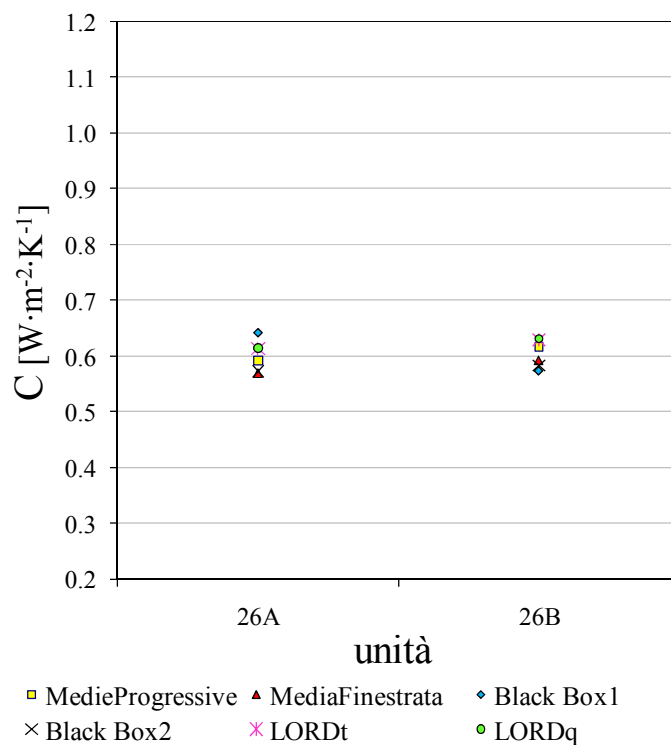
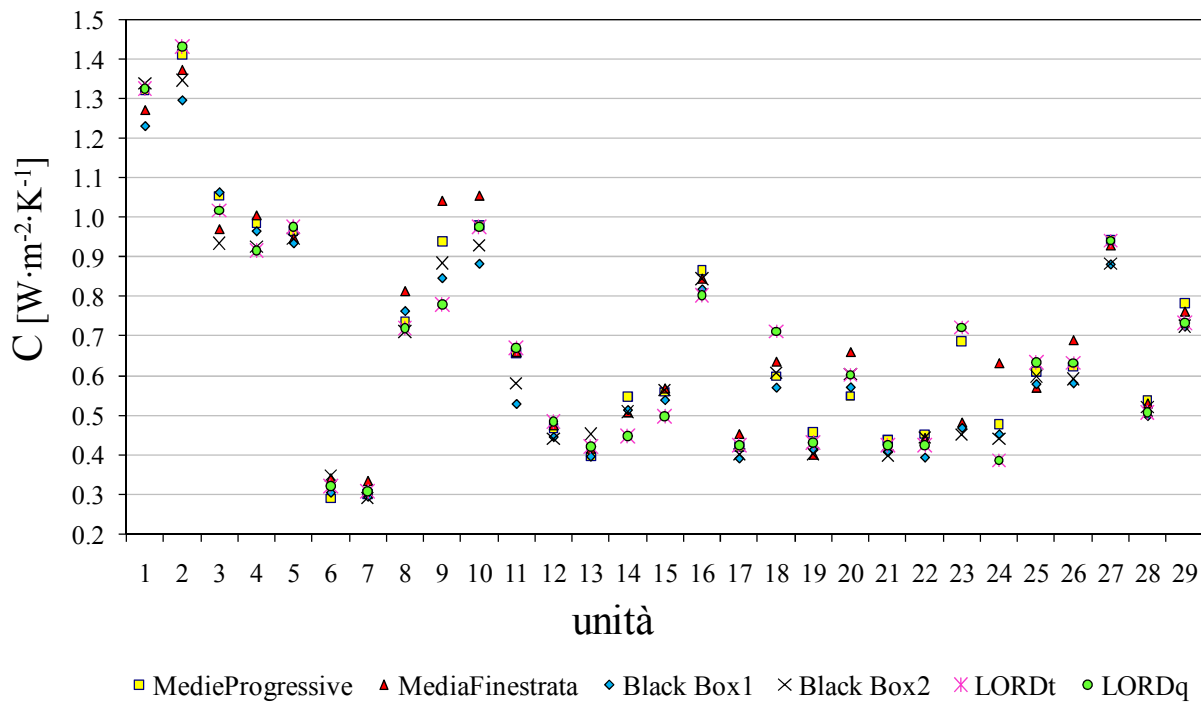
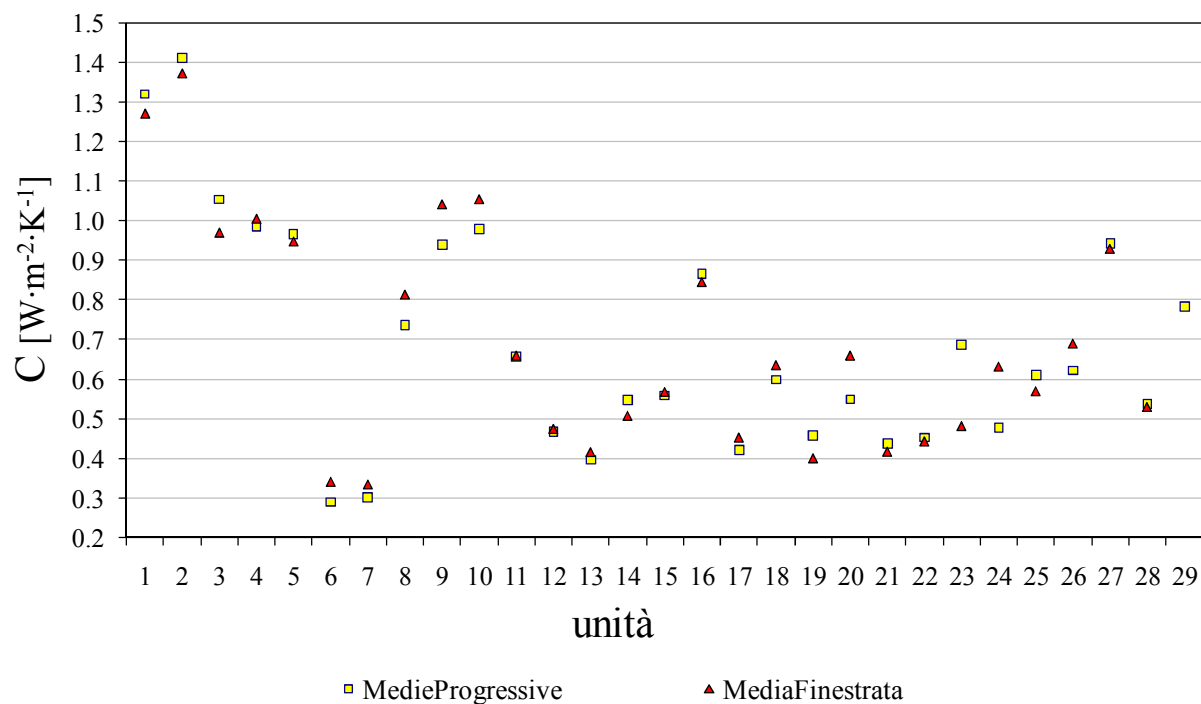


Fig. 2.8.2: risultati delle misure sull'unità 26 in corrispondenza dello stesso punto e a breve distanza di tempo l'una dall'altra.

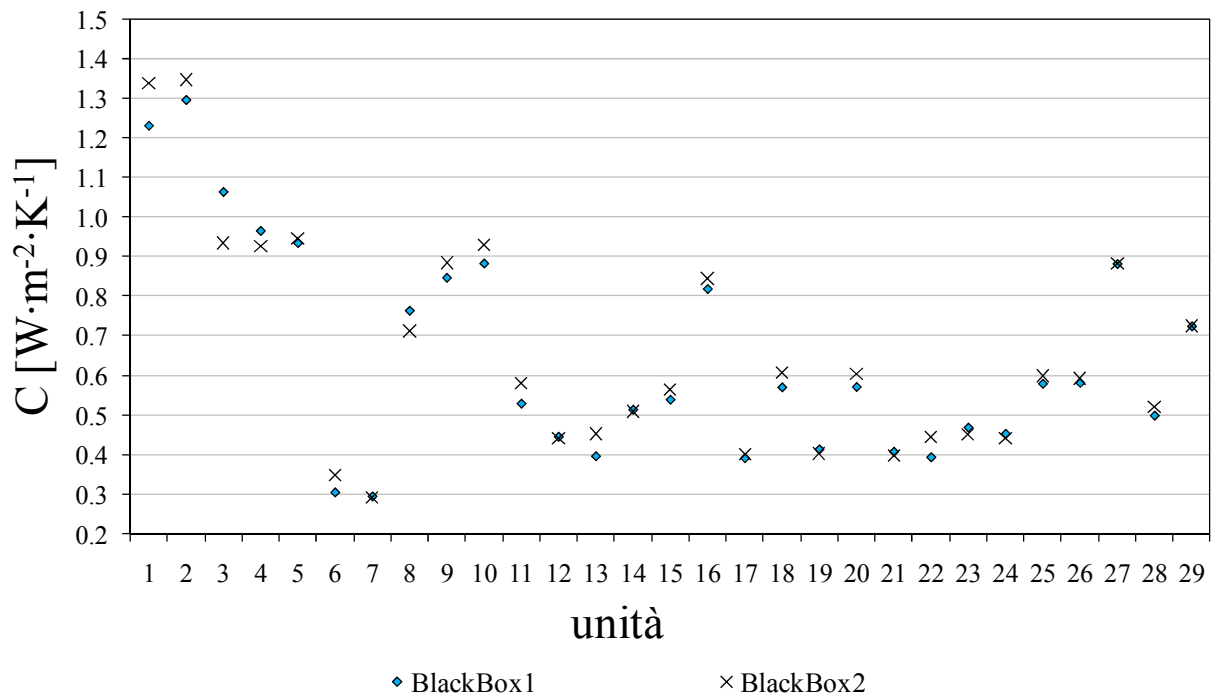
Di seguito si riportano i grafici con il riassunto dei risultati ottenuti con i vari metodi: in Fig. 2.8.3 tali risultati sono ripartiti in base all'anno, dal più vecchio al più moderno. Il confronto con i valori nominali è riportato in Fig. 2.8.4 per tutti gli edifici, in Fig. 2.8.5 per quelli di vecchia concezione, in Fig. 2.8.6 per quelli moderni in cui la progettazione abbia riservato una certa attenzione dal punto di vista energetico, oppure sottoposti a coibentazione dell'involucro.



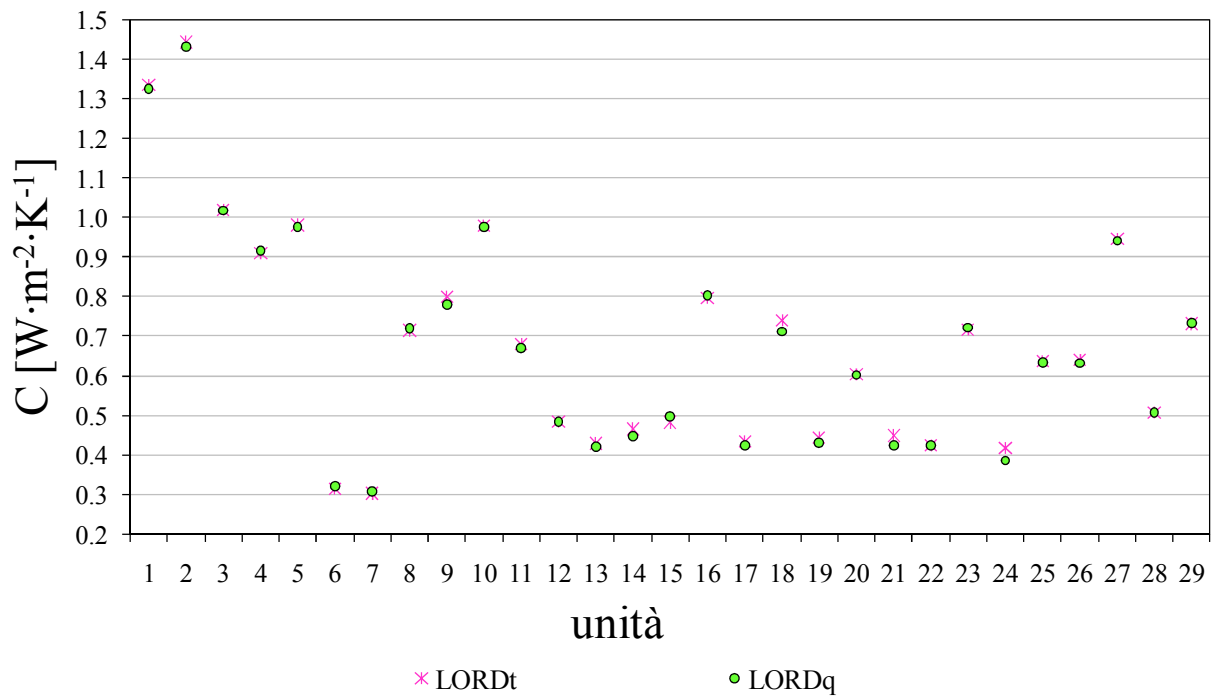
(A)



(B)

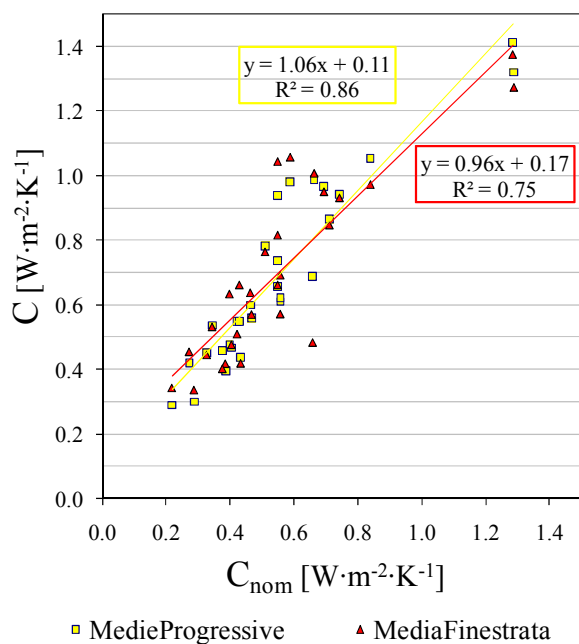


(C)

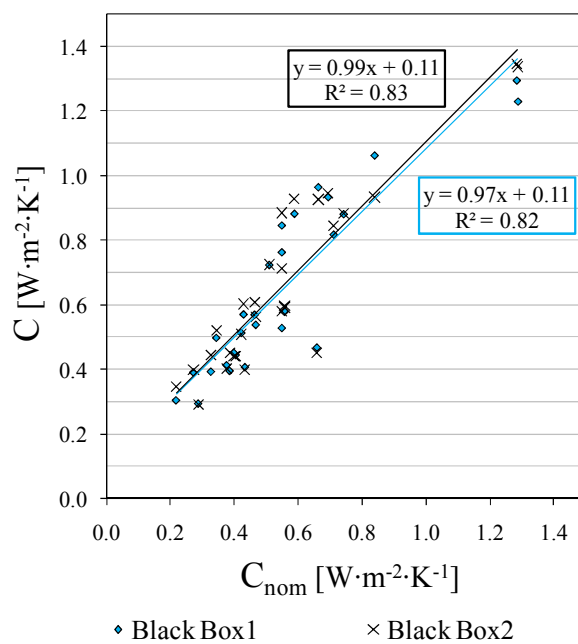


(D)

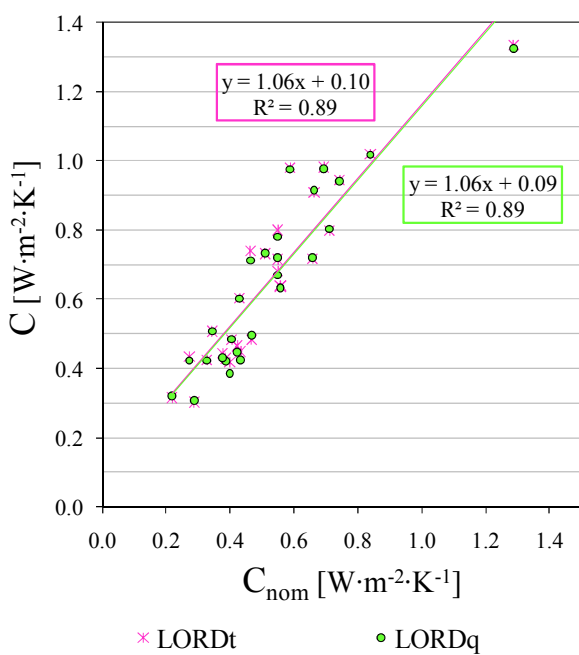
Fig. 2.8.3: risultati per gli edifici testati nella campagna di misura con: (A) tutti i metodi, (B) metodi delle Medie Progressive e Media Finestrata, (C) Black Box 1 e 2, (D) LORDt e LORDq.



(A)

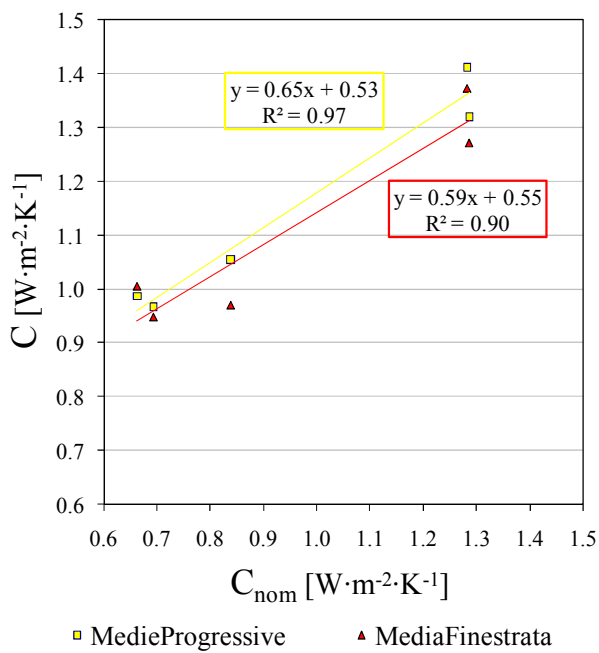


(B)

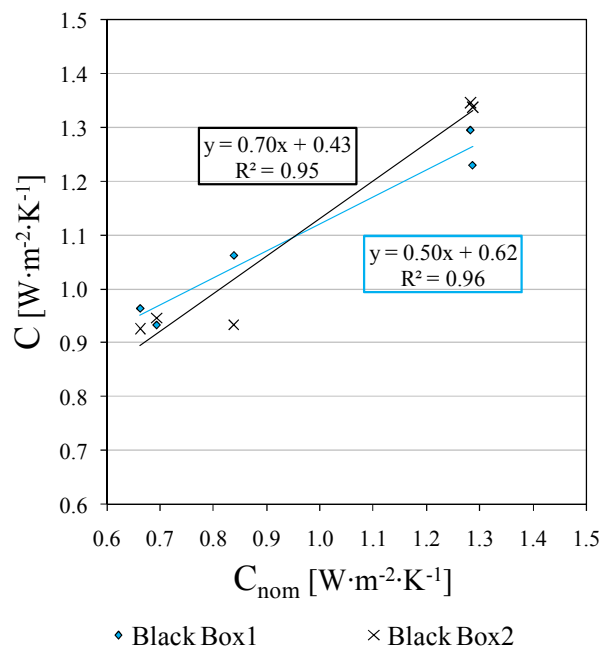


(C)

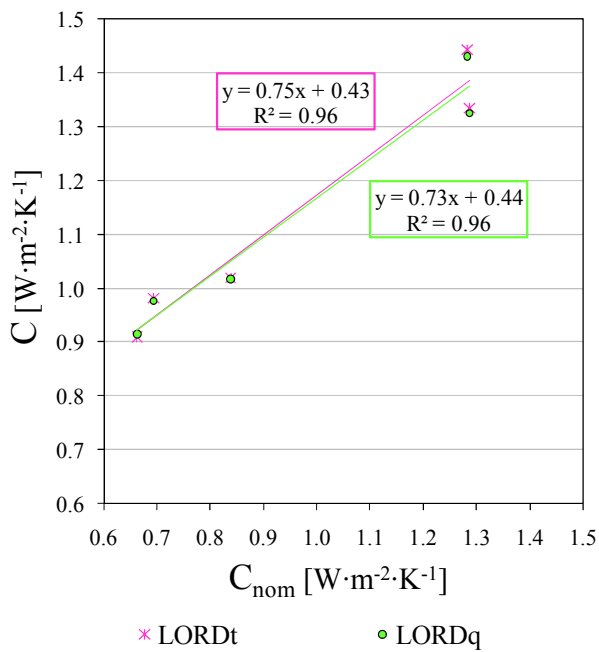
Fig. 2.8.4: confronto, per tutti gli edifici testati, fra conduttanze nominali e valutate con i vari metodi di analisi, (A) metodi delle Medie Progressive e Media Finestrata, (B) Black Box 1 e 2, (C) LORDt e LORDq.



(A)



(B)



(C)

Fig. 2.8.5: confronto, per gli edifici testati di vecchia concezione, fra conduttanze nominali e valutate con i vari metodi di analisi, (A) metodi delle Medie Progressive e Media Finestrata, (B) Black Box 1 e 2, (C) LORDt e LORDq.

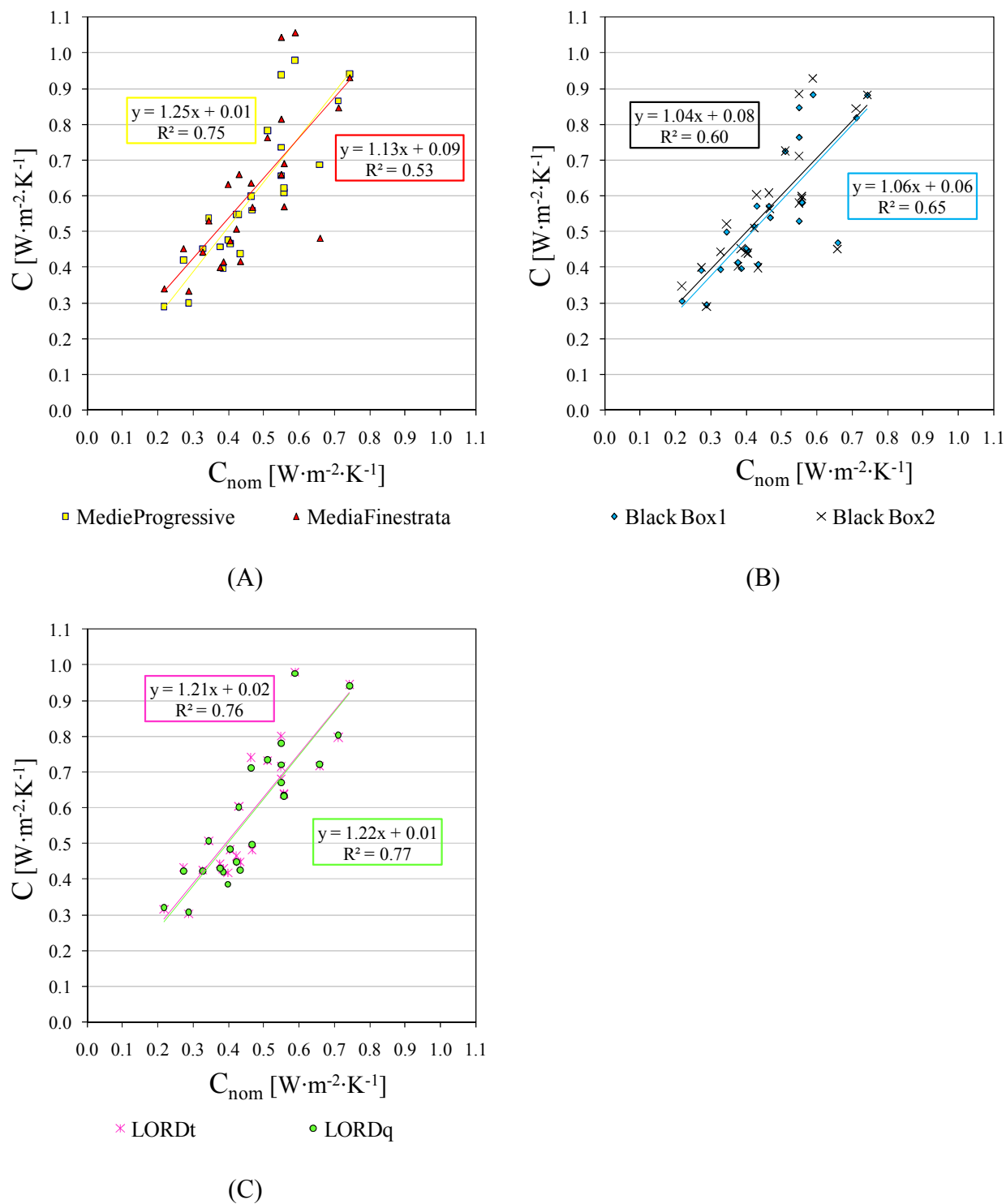


Fig. 2.8.6: confronto, per gli edifici testati di nuova concezione e sottoposti a coibentazione dell'involucro, fra conduttanze nominali e valutate con i vari metodi di analisi, (A) metodi delle Medie Progressive e Media Finestrata, (B) Black Box 1 e 2, (C) LORDt e LORDq.

2.9 Discussione dei risultati della campagna di misure

I risultati della campagna di misure esposti in 2.8 evidenziano alcuni aspetti. In particolare, i risultati di Fig. 2.8.1 mettono in risalto come, per i quattro casi di due misure effettuate sulla stessa unità ma in corrispondenza di punti e periodi differenti, soltanto per l'edificio 19 si ottengano valori confrontabili dei risultati; negli altri tre casi (edifici 3, 18 e 20) si nota una forte variabilità. Ciò si realizza a parità di conduttanza nominale dichiarata: uno dei motivi che potrebbero contribuire a spiegare tale comportamento come evidenziato in Sez. 2.4, potrebbe essere la differente serie di dati di input. In effetti, i casi 3B, 18A e 18B, e 20A e 20B presentano dati di input interessati da una forte variabilità o da un trend in temperatura. Inoltre, eventuali difetti di posa o la presenza più o meno rilevante dei giunti di malta tra le strutture potrebbero essere di particolare influenza. La Fig. 2.8.2 evidenzia, invece, risultati confrontabili per due misure effettuate con lo strumento nella stessa posizione e in periodi di tempo ravvicinati. Quanto ora discusso, però, mette in risalto il fatto che la metodologia per la misura in opera debba essere ulteriormente sviluppata. Ad esempio, per pareti in laterizio sarebbe utile la definizione di un protocollo per stabilire la posizione dello strumento di misura in particolare in funzione della collocazione del giunto di malta, individuabile attraverso l'ausilio della termografia, oppure per definire la possibilità di effettuare più misure in opera e ricavare un valore medio di conduttanza (il flussimetro utilizzato nella campagna di misure ha un'area utile di $180 \times 180 \text{ mm}^2$, dunque tale da fornire una stima del flusso medio specifico tra laterizio e giunto). Per quanto riguarda edifici che presentano lo stesso valore di conduttanza nominale, le prove sulle unità 25 e 26 presentano valori tra di loro confrontabili (eccezion fatta per il risultato ottenuto con il metodo della Media Finestrata), mentre i risultati dei casi 8, 9 e 11 presentano una notevole variabilità fra di loro (si confrontino a tal proposito i risultati in Tab. 2.11). Ciò testimonia il fatto che edifici che hanno la stessa C_{nom} in opera possono evidenziare valori di C differenti. E' invece da segnalare come i casi degli edifici riqualificati 6 e 7, situazioni per le quali si prevedeva un valore di conduttanza piuttosto basso visto lo spessore di isolante, abbiano fornito un valore soddisfacente, ed inoltre il caso dell'edificio 3, per il quale si è effettuata la misura prima e dopo l'intervento di riqualificazione, ha evidenziato una diminuzione del valore di conduttanza (sebbene permanga una differenza tra valore teorico e derivante da misura). Questi ultimi aspetti sembrano attestare la validità della misura di conduttanza in opera. Le analisi riportate in Fig. 2.8.3 evidenziano una certa variabilità dei risultati ottenuti con i vari

metodi, tuttavia la maggior parte dei valori di conduttanza si attesta nell'intervallo $0.3-1.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Si segnala però, seguendo le considerazioni di Sez. 2.4 - 2.6, che lo strumento più adatto alle analisi sembra essere il software LORD. In Fig. 2.8.4 è riportato il confronto tra valori nominali di conduttanza e derivanti da analisi con i vari metodi per tutti gli edifici; tuttavia sembra opportuno distinguere tra edifici più vecchi facenti parte del parco edilizio esistente (fino all'inizio degli anni 2000), in Fig. 2.8.5, e quelli soggetti a riqualificazione o di 'nuova concezione', ovvero concepiti già con criteri di sostenibilità energetica in seguito ai provvedimenti legislativi menzionati precedentemente, in Fig. 2.8.6, per i quali il valore di conduttanza nominale si può ritenere noto con maggiore accuratezza, vista la disponibilità di personale direttamente responsabile della costruzione. Dunque, per quest'ultimo caso (edifici moderni) e considerando l'analisi con il software LORD, circa il 90% dei valori di conduttanza misurati per le strutture si colloca nell'intervallo tra $0.3-0.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Il valore misurato di C risulta essere, nella maggioranza dei casi, maggiore di quello nominale: ciò può essere conseguenza di diversi fattori, fra cui il contributo dovuto all'umidità, difficilmente stimabile in sede di progetto, l'effettivo spessore dei giunti di malta, e la presenza di eventuali errori di posa, propri della struttura esistente e dunque non prevedibili in progettazione. L'entità di tale aumento, con riferimento alla curva di Fig. 2.8.6.C, è di circa il 22%. Tuttavia si segnala quanto discusso nelle Sez. 2.4 e 2.6 e richiamato in Sez. 2.7, ovvero che i valori derivanti dall'analisi rappresenterebbero una sottostima del valore idealmente assunto dalla struttura. Ciò causerebbe un ulteriore aumento del valore reale di C rispetto a quello di progetto.

2.10 L'effetto della conduttanza sul fabbisogno energetico

In questa sezione si discute l'analisi, svolta attraverso simulazioni orarie con il software TRNSYS (TRNSYS 2000), della valutazione dei fabbisogni netti di energia per la climatizzazione invernale di un edificio tipo posto in tre climi differenti, ricavati mediante file climatici Energy Plus (ENERGY PLUS 2010). In particolare, per lo stesso edificio tipo si sono valutati i fabbisogni netti di energia per la climatizzazione utilizzando i valori nominali di conduttanza pari a 0.20, 0.40, 0.60 e 0.80 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, e quelli derivanti dall'interpolazione della curva di Fig. 2.8.6.C a partire dagli stessi valori menzionati di C_{nom} . Si è scelto di utilizzare la curva derivante da analisi mediante software LORD (Fig. 2.8.6.C), poiché questo è risultato, in Sez. 2.4-2.6, lo strumento più idoneo per il post-processing dei dati misurati, e l'output dei flussi poiché in tal caso la curva presenta il maggior valore di R^2 . La conduttanza è stata variata attraverso la riduzione dello spessore di isolante, per cercare di influire nella minore misura possibile sulle caratteristiche di capacità termica dell'edificio stesso. L'analisi è stata condotta utilizzando le dimensioni esterne nel software TRNSYS: le caratteristiche dell'edificio tipo considerato sono in Tab. 2.12.

Superficie netta riscaldata [m^2]	90
Volume riscaldatao [m^3]	311
Superficie netta non riscaldata [m^2]	45
Volume non riscaldatao [m^3]	155
Rapporto Area finestrata/Superficie netta riscaldata	1/6
Percentuale area del telaio rispetto la superficie trasparente totale	15%
Carichi interni	conformi a valori di progetto per edifici residenziali EN 13790:2008
n zona riscaldata [h^{-1}]	0.3
n zona non riscaldata [h^{-1}]	0.5

Tab. 2.12: caratteristiche dell'edificio tipo simulato.

I risultati dell'analisi sono esposti in Tab. 2.13.

Caso	Conduttanza termica	VENEZIA		FRANCOFORTE		STOCCOLMA	
		F_N [kWh·m ⁻²]	Var.Rel.* %	F_N [kWh·m ⁻²]	Var.Rel.* %	F_N [kWh·m ⁻²]	Var.Rel.* %
A	$C_{nom} = 0.2 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	45	+19%	81	+17%	93	+16%
A'	C_{LORDq} per C_{nom} caso A	53		95		107	
B	$C_{nom} = 0.4 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	73	+17%	127	+15%	140	+15%
B'	C_{LORDq} per C_{nom} caso B	85		146		161	
C	$C_{nom} = 0.6 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	96	+15%	163	+15%	179	+14%
C'	C_{LORDq} per C_{nom} caso C	111		187		204	
D	$C_{nom} = 0.8 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	116	+13%	195	+12%	212	+12%
D'	C_{LORDq} per C_{nom} caso D	131		219		238	

* Variazione relativa calcolata come differenza tra fabbisogno netto F_N' ottenuto considerando le conduttanze interpolate, e calcolato con le conduttanze nominali, F_N , per gli elementi di involucro, in funzione di F_N : $(F_N' - F_N)/F_N$

Tab. 2.13: risultati delle simulazioni dei fabbisogni netti per la climatizzazione invernale per edifici con valori nominali di conduttanza termica e valori di conduttanza ottenuti da interpolazione della curva di Fig. 2.8.6.C per gli elementi di involucro opachi, nei climi di Venezia, Francoforte e Stoccolma.

Dall'esame di Tab. 2.13, si nota come l'implementazione delle conduttanze, ricavate dall'analisi delle misure di Sez. 2.8, causi in tutti i casi un aumento relativo rispetto al fabbisogno netto valutato con i valori nominali di conduttanza. In particolare tale aumento è più marcato per i casi con valori minori di conduttanza, ovvero per le strutture più isolate termicamente, e per il clima più mite: infatti nel clima di Venezia, e per il caso con C_{nom} pari a $0.20 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ tale entità raggiunge il picco del 19%, mentre i casi equivalenti nei climi di Francoforte e Stoccolma presentano un picco del 17% e 16% rispettivamente. Per le strutture con conduttanza maggiore l'aumento relativo diminuisce fino ai valori di 13% di differenza tra soluzione con conduttanze derivanti da interpolazione e nominali per il clima di Venezia, e di 12% per i climi di Francoforte e Stoccolma, per il caso di C_{nom} pari a $0.8 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

2.11 Conclusioni

Nel lavoro esposto in questo capitolo, attraverso l'analisi teorica si è valutato il contributo di diversi fattori che influiscono sulla misura di conduttanza in opera, tra cui la presenza del regime dinamico nei dati rilevati e la presenza del flussimetro stesso nel sistema considerato. Il contributo di questi fattori, mediante analisi con i principali metodi di post-processing, è stato valutato relativamente ad un caso studio di riferimento attraverso simulazioni FEM con dati derivanti da un caso reale, secondo le indicazioni di lavori presenti in letteratura. Inoltre, si sono valutate l'entità dell'influenza sul risultato finale di una differenza di emissività tra superficie di intonaco e flussimetro, aspetto che i lavori in letteratura non considerano in maniera approfondita, e dell'incertezza legata al rilevamento dei dati di input, ed inoltre si è considerata la possibilità di misurare la temperatura superficiale del flussimetro anziché quella della superficie interna. Da quest'analisi, dunque, si possono ricavare alcuni suggerimenti per il miglioramento della catena di misura, quali potrebbero essere appunto la rilevazione della temperatura superficiale del flussimetro, e per la metodologia di misura, un approfondimento della differenza di comportamento alla radiazione di flussimetro ed intonaco. Inoltre potrebbe essere presa in considerazione l'ipotesi di valutare preventivamente i dati di input per stimare l'eventuale influenza di una caduta di temperatura non trascurabile nelle serie di dati sul risultato finale. Con riferimento ai metodi di post-processing sembra che l'approccio del software LORD abbia garantito i migliori risultati per il caso di studio analizzato.

Per quanto riguarda la campagna di misure, questo lavoro rappresenta uno sforzo per caratterizzare il parco edilizio italiano esistente. Date le disposizioni legislative vigenti in materia energetica, ed in maniera particolare per il caso italiano di DLgs 192/05 2005, DLgs 311/06 2006 e DPR 59/09 2009, si è cercato di verificare se gli edifici possano realmente rispettare quanto prescritto. In particolare, adottando l'approccio del software LORD si registra, con riferimento ai casi di edifici moderni analizzati, un aumento del 20% circa del valore di C misurato rispetto a C_{nom} . Come ampiamente discusso, viste le caratteristiche e criticità che la misura presenta e poiché i materiali in opera sono sottoposti all'azione degli agenti atmosferici e a sollecitazioni termiche molto diverse fra loro a seconda dei periodi dell'anno, determinando variazioni delle proprietà dei materiali stessi difficilmente stimabili in sede di progetto, sembra necessario distinguere tra la definizione di criteri relativi alla misura in opera e validi in progettazione. Infatti l'esigenza più importante è garantire che l'edificio sia effettivamente costruito secondo

criteri di risparmio energetico poiché si vuole ridurre il fabbisogno per la climatizzazione, anche mediante un controllo sullo stato di fatto del costruito: è noto infatti che ogni edificio può presentare valori diversi tra C_{nom} e valore in opera, come i casi analizzati evidenziano. Ciò può avvenire ad esempio a causa di eventuali operazioni di posa non eseguite a regola d'arte. In quest'ottica si segnala l'utilità di un database che caratterizzi il parco edilizio esistente dal punto di vista del valore di conduttanza in opera, per definire criteri di riferimento da rispettare, ad esempio distinguendo in base all'anno di costruzione ed alla zona climatica in cui è situato l'edificio stesso. Dunque, la verifica in opera potrebbe essere prescritta per legge una volta stabiliti tali criteri, ad integrare quanto già previsto in sede progettuale per la caratterizzazione energetica degli edifici; inoltre potrebbe essere introdotto un sistema di merito per le unità più virtuose e per le imprese di costruzione che le hanno realizzate. A seguito di misura in opera, uno scostamento da valori di riferimento opportunamente definiti certificherebbe la presenza di un'anomalia nell'elemento. Per quanto riguarda il fabbisogno netto di energia per la climatizzazione invernale dell'edificio, si nota una certa differenza tra quello valutato implementando il valore nominale di conduttanza per le strutture e quello ricavato dall'analisi delle misure effettuate; in particolare in quest'ultimo caso il fabbisogno netto dell'edificio risulta superiore di un'entità variabile a seconda del clima e del valore di conduttanza di riferimento (con il picco del +19% di aumento relativo tra fabbisogno valutato con le conduttanze ricavate da interpolazione rispetto quelle nominali nel clima di Venezia, e per valori nominali di conduttanza degli elementi di involucro di $0.20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Tuttavia nell'analisi teorica si è evidenziato come la misura in opera fornisca una sottostima del valore di conduttanza: dunque l'aumento del fabbisogno potrebbe risultare in realtà addirittura superiore.

2.12 Bibliografia

- ALMEMO. Manual for all ALMEMO measuring instruments, 6th revised edition. Ahlborn, 2005.
- Androutsopoulos, A, J J Bloem, H A L Van Dijk, e P H Baker. «Comparison of user performance when applying system identification for assessment of the energy performance of building components.» *Building and Environment*, 2008: 43:189-196.
- Avdelidis, N P, e A Moropoulou. «Emissivity considerations in building thermography.» *Energy and Buildings*, 2003: 35:663-667.
- Awbi, H B. «Calculation of convective heat transfer coefficients of room surfaces for natural convection.» *Energy and Buildings*, 1998: 28:219-227.
- Baker, P. «IQ-test—improving quality in testing and evaluation of solar and thermal characteristics of building components.» *Energy and Buildings*, 2004: 36:435-441.
- Bloem, J J. «System identification applied to building performance data.» Luxembourg Brussels: Joint Research Centre European Commission, 1994.
- Bloem, J J, U Norlén, H Madsen, H Melgaard, e J Kreider. «System identification competition.» Luxembourg Brussels: Joint Research Centre European Commission, 1996.
- Brager, G S, e R J De Dear. «Thermal adaptation in the built environment: a literature review.» *Energy and Buildings*, n. 27 (1998): 83-96.
- COMSOL. COMSOL Multiphysics 3.5: User's Manual. 2008.
- DLgs 192/05. «Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.» *Gazzetta Ufficiale* n.222 del 23 Settembre 2005 suppl. ord. n. 158, 19 Agosto 2005.
- DLgs 311/06. «Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311. Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.» *Gazzetta Ufficiale* n.26 del 1 Febbraio 2007 suppl. ord. n. 26/L., 29 Dicembre 2006.
- DPR 412/93. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia. *Gazzetta Ufficiale* n.96 del 14/10/1993 in attuazione dell'art. 4, comma 4 della Legge 9 Gennaio 1991, N.10, Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, 1993.

DPR 59/09. «Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009 , n. 59. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico.» Gazzetta Ufficiale n.132 del 10 Giugno 2009, 2 Aprile 2009.

EN ISO 6946:2008. «Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method .» 2008.

EN ISO10456:2008. «Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values.» 2008.

ENERGY PLUS. «ENERGY PLUS Energy Simulation Software, U.S. Department of Energy.» 2010.

Gutschker, O. LORD-Modelling and identification software for thermal systems, user manual. Germany BTU Cottbus: www.paslink.org, 2004.

Gutschker, O. «Parameter identification with the software package LORD.» Building and Environment, 2008: 43:163-169.

ISO 9869:1994. ISO 9869 Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance. Switzerland, Geneve, August 1994: ISO, 1994.

ISO GUIDE. «ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement.» 1995.

Jiménez, M J, B Porcar, e M R Heras. «Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions.» Solar Energy, 2008: 82:573-587.

Jiménez, M J, B Porcar, M R Heras, e I. «Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value.» Building and Environment, 2009: 44:361-367.

Jiménez, M J, H Madsen, e K K Andersen. «Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB.» Building and Environment, 2008: 43:170-180.

Khalifa, A J N, e R H Marshall. «Validation of heat transfer coefficients on interior building surfaces using a real-size indoor test cell.» International Journal of Heat Mass Transfer, 1990: Vol. 33, No 10, 2219-2236.

Ljung, L. System identification. Theory for the user. Englewood Cliffs NJ: Prentice Hall, 1999.

Mazzarella, L. «Dati Climatici “G. De Giorgio”.» Atti Giornata si studio a memoria "Giovanni deGiorgio" Politecnico di Milano, Dip. Energetica. Milano, 18 Novembre 1997, 1997.

Perino, M. «La misura della trasmittanza in opera di pareti edilizie.» Convegno Anit Saie. Bologna, 2005.

Trethowen, H. «Measurement Errors with Surface-mounted Heat Flux Sensors.» *Building and Environment*, 1986: Vol. 21 No. 1;41-56.

TRNSYS. TRNSYS Manual, A Transient Simulation Program. Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison, 2000.

UNI 10351:1994. «Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore.» 1994.

UNI 10355:1994. «Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore.» 1994.

Wouters, P, L Vandaele, P Voit, e N Fisch. «The use of Outdoor Test Cells for Thermal and Solar Building Research within the PASSYS Project.» *Building and Environment*, 1993: Vol. 28 n°2 pp 107-113.

3 Capitolo 3. La determinazione della permeabilità all'aria degli edifici attraverso prove di pressurizzazione mediante ventilatore

Riassunto

In questo capitolo si discutono aspetti teorici legati alle prove di pressurizzazione mediante ventilatore per la determinazione della permeabilità all'aria dell'involucro edilizio. In particolare, sono descritti i metodi mediante i quali eseguire le prove secondo i criteri definiti da normativa vigente, inoltre sono riportate le principali grandezze ottenibili come risultati delle prove. Successivamente, sono esposti e discussi i risultati di una campagna di misure di pressurizzazione relativa agli anni 2008-2010 per edifici in Veneto. Infine, per alcuni degli edifici testati sono riportate e discusse alcune simulazioni attraverso un codice di modellazione; l'obiettivo di tale analisi è di ricavare il tasso di ricambi orari n per un edificio mediante l'elaborazione dei risultati ottenuti dalle prove di pressurizzazione.

Nomenclatura

g	accelerazione di gravità, 9.81 [m·s ⁻¹]
v	velocità del vento [m·s ⁻¹]
n	indice di ricambi orari [h ⁻¹]
n_{50}	ricambio d'aria alla differenza di pressione di riferimento di 50 Pa [h ⁻¹]
\dot{V}	portata d'aria [m ³ ·h ⁻¹]
\dot{V}_{50}	portata di infiltrazione di aria alla differenza di pressione di riferimento di 50 Pa [m ³ ·h ⁻¹]
V	volume interno [m ³]
q_{50}	permeabilità all'aria alla differenza di pressione di riferimento di 50 Pa [m ³ ·h ⁻¹ ·m ⁻²]
A_E	superficie di involucro [m ²]
w_{50}	portata specifica di infiltrazione alla differenza di pressione di riferimento di 50 Pa [m ³ ·h ⁻¹ ·m ⁻²]
A_F	superficie netta del pavimento [m ²]
ELA	effective leakage area [m ²]
$u(n_{50})$	incertezza sulla lettura di n_{50} [h ⁻¹]
$u(q_{50})$	incertezza sulla lettura di q_{50} [m ³ ·h ⁻¹ ·m ⁻²]
$u(w_{50})$	incertezza sulla lettura di w_{50} [m ³ ·h ⁻¹ ·m ⁻²]

3.1 La prova di pressurizzazione e lo stato dell'arte

Nella moderna progettazione dell'involucro edilizio secondo criteri di risparmio energetico e sostenibilità ambientale, un problema da considerare è la valutazione delle infiltrazioni d'aria che interessano un ambiente. La presenza incontrollata di infiltrazioni può influenzare negativamente diversi aspetti legati all'ambiente interno, quali la qualità dell'aria interna, il comfort termoacustico, la possibilità di formazione di muffe o condense, e causa un aumento del fabbisogno di energia per la climatizzazione. Per quanto riguarda la qualità dell'aria, se l'infiltrazione avviene attraverso le murature da locali quali scantinati, garage etc., vi è il rischio che questa si arricchisca di agenti inquinanti come polveri derivanti dai materiali da costruzione oppure radon. Per quanto concerne il comfort termico, si può osservare come la presenza di infiltrazioni localizzate possa creare un livello elevato di discomfort dovuto alla formazione di correnti fredde, mentre la discontinuità delle strutture costituenti l'involucro può favorire la propagazione di rumori provenienti dall'esterno, con conseguente peggioramento del comfort acustico. Riguardo la qualità dell'involucro, è da sottolineare come in inverno la presenza di infiltrazioni d'aria fredda possa concorrere all'abbassamento di temperatura superficiale in corrispondenza dei ponti termici dell'involucro stesso (cordoli, angoli etc.), con la possibilità di formazione di muffe o condense. Inoltre, la presenza di infiltrazioni d'aria causa una diminuzione o un aumento della temperatura media interna (rispettivamente nelle stagioni invernale ed estiva); ciò comporta maggiori oneri per la climatizzazione con conseguente aumento di risorse impiegate e, quindi, di costi. Dunque, per quanto fin qui osservato, individuare ed arginare l'effetto negativo delle infiltrazioni d'aria è necessario per garantire una progettazione ed esecuzione di qualità dell'involucro; va segnalato, comunque, che un adeguato tasso di ventilazione deve essere comunque assicurato per garantire il comfort e la qualità dell'aria, ad esempio mediante un impianto di ventilazione meccanica controllata o, se non presente, mediante una corretta gestione dell'edificio.

La permeabilità all'aria di un edificio può essere determinata attraverso il test di pressurizzazione mediante ventilatore denominato *Blower Door test*: attraverso l'installazione di un ventilatore in corrispondenza di una porta (o finestra) che divide la zona condizionata dall'ambiente esterno si induce una depressione o una sovrappressione all'interno dell'ambiente considerato, rispettivamente richiamando aria dall'edificio verso l'esterno o pomandola verso l'interno. I metodi secondo cui disporre la prova ed i risultati che questa fornisce sono discussi in

questo capitolo; in particolare, si valuta la possibilità di ricondursi dall'indice di ricambio orario alla differenza di pressione di riferimento $n_{\Delta pr}$, ricavato mediante la prova di pressurizzazione, all'indice di ricambi orari dell'ambiente ventilato n . Si specifica fin da ora che la misura diretta di quest'ultimo è possibile solo mediante il metodo del gas tracciante, che non viene considerato ai fini di questa trattazione.

In letteratura si trovano diversi studi che riguardano principalmente nord America, nord Europa e Europa dell'Est. Sherman in (Sherman, 1995) prende in considerazione diversi aspetti che riguardano la prova di pressurizzazione su edifici monozona del Nord America; in particolare definisce dei limiti al di fuori dei quali l'involucro si può considerare troppo impermeabile o, al contrario, troppo permeabile, e riporta due differenti criteri per definire un tasso medio di ricambio orario legato all'infiltrazione per valutazioni riguardo la concentrazione di inquinanti nell'aria ed il fabbisogno di energia per la climatizzazione. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, Sherman richiama il criterio, da lui stesso definito in (Sherman, 1986), dei Gradi Giorno d'Infiltrazione; in tal modo, viene considerato il periodo dell'anno in cui si ha l'infiltrazione stessa, poiché questa è, dal punto di vista energetico, più gravosa quando la temperatura esterna è fortemente minore (caso invernale) o maggiore (caso estivo) di quella interna. Sherman e Dickerhoff in (Sherman e Dickerhoff, 1994) analizzano i dati presenti nel catalogo di misure di permeabilità del LBL (Lawrence Berkeley Laboratory, University of California) che riguardano prevalentemente edifici monozona (ovvero case monofamiliari) ed utilizzano questi dati per caratterizzare in termini di regione, età, tipo di costruzione e qualità costruttiva, gli edifici del Nord America.

Inoltre, per edifici monozona nelle abitazioni del Nord America, Karagiozios in (Karagiozios 2001) presenta un'analisi sull'influenza della portata d'infiltrazione sui rischi legati alla presenza di umidità (condensazione, muffe) per un esempio di pacchetto murario, sviluppando un modello igrotermico. I risultati di questo studio mostrano come la portata d'aria d'infiltrazione abbia un effetto significativo sulla performance igrotermica del muro stesso.

In merito all'analisi dell'incertezza legata ai risultati delle misure in questione, in (Sherman e Palmiter, 1994) è affrontato il problema di valutare l'incertezza delle misure di portata d'aria e di pressione che compongono la misura di permeabilità all'aria di edifici; in particolare, in questo lavoro si distingue tra valutazione dell'incertezza della singola misura di portata d'aria attraverso l'edificio in corrispondenza di una certa differenza di pressione (one-point analysis) e, caso in realtà piuttosto complesso, dell'incertezza correlata all'estrapolazione dalle misure della portata

d'aria per basse pressioni, come è necessario per la definizione dell'ELA (parametro equivalente che verrà descritto in seguito in questo capitolo).

Il problema di ricondursi ad un'informazione relativa all'infiltrazione, e dunque all'indice di ricambi orari n , a partire dai risultati ottenuti da una prova di pressurizzazione, ovvero lo studio di una possibile correlazione tra permeabilità all'aria dell'edificio ed infiltrazione, è preso in considerazione da Sherman in (Sherman, 1987). In questo lavoro sono riassunti alcuni modelli riguardo questo tema, ed è proposto un ulteriore modello per la stima dell'infiltrazione annuale sulla base dei risultati della prova di pressurizzazione per edifici monozona in USA e Canada, mediante fattori che riguardano caratteristiche dell'edificio stesso e del clima.

In (Montoya, et al. 2010), viene stimata la permeabilità di edifici in Catalogna ed è presentata un'analisi statistica, a partire da un catalogo di prove di pressurizzazione francesi riguardanti edifici monofamiliari, per identificare le caratteristiche dell'edificio, quali tipo di struttura, area del pavimento, anno di costruzione, numero di piani e tipo di isolamento, che hanno la maggiore influenza sulla permeabilità all'aria dell'involucro. Infine, nello stesso lavoro, è sviluppato un modello di predizione per derivare un valore stimato di ricambio orario alla differenza di pressione di riferimento dell'involucro a partire dalle succitate caratteristiche e, da tale metodo, viene sviluppato un modello per determinare le caratteristiche d'infiltrazione, dunque l'indice di ricambi orari n .

Il metodo di pressurizzazione permette la valutazione della permeabilità all'aria dell'intero edificio; alcuni studi in letteratura analizzano il contributo dei singoli componenti dell'involucro sul risultato finale. In (Tamura 1975) è descritta una serie di prove condotte su case in legno in Canada mediante le quali è valutata la permeabilità attraverso finestre, porte, muri e soffitti separatamente. Dickerhoff et al. in (Dickerhoff, Grimsrud e Lipschutz 1982) dispongono una serie di misure di pressurizzazione di ciascun componente, in particolare di camini, condotti per il ricambio d'aria di bagni e cucine, terminali dell'impianto elettrico e aperture in condotti per la ventilazione forzata, e ne determinano il contributo alla distribuzione di permeabilità all'interno di una struttura per case del Nord America. In Europa, Kalamees et al. in (Kalamees, et al. 2008) analizzano la ripartizione delle fessure che causano l'infiltrazione sui singoli componenti in case singole ed appartamenti in Finlandia, attraverso indagine termografica e metodo del gas tracciante. In (Levin 1988) si discutono i risultati da misure in differenti appartamenti in Svezia, distinguendo tra fessure all'interno dell'edificio tra unità ed unità, e tra l'involucro e l'ambiente esterno.

Per quanto riguarda l'analisi mediante modelli aerodinamici, in (Blomsterberg, et al. 1999) si discute un'analisi attraverso misure ed elaborazione numerica per abitazioni in Svezia: mediante un'implementazione dei casi osservati con il modello multi zona COMIS, predizioni sui valori di portata d'aria sono confrontate con i valori misurati. Anche in tale analisi è trattato dunque il problema della distribuzione dell'area d'infiltrazione sui singoli componenti. In (Haghighat, 2003) è descritta una metodologia per ripartire l'area di infiltrazione attraverso fessurazioni su pareti esterne e tetto, e si riporta la validazione di tre modelli aerodinamici, COMIS, CONTAM e ESP-r, che sono implementati per predire i tassi d'infiltrazione in case singole. Haghighat e Megri in (Haghighat e Megri, 1996) validano i modelli COMIS e CONTAM attraverso confronto tra i risultati ottenuti dai modelli stessi, confronto con dati sperimentali raccolti in ambiente controllato, e confronto con risultati di misure con gas tracciante su edifici monofamiliari in Canada.

3.2 La ventilazione e l'infiltrazione

Per evidenziare gli obiettivi del metodo di pressurizzazione trattato in questo capitolo, noto anche come 'Blower Door Test', si richiamano alcuni concetti correlati alla ventilazione negli edifici. Secondo quanto riportato in (ASHRAE, Ventilation and Infiltration, Chapter 27 2005), il ricambio d'aria all'interno di un ambiente con aria esterna, può essere suddiviso in due classi: ventilazione ed infiltrazione. La portata d'aria di ventilazione è quella necessaria per garantire una qualità dell'aria interna accettabile; può essere introdotta per convezione naturale, se trae origine dalla dipendenza della densità del fluido dalla temperatura (stack effect), per convezione forzata, se originata dall'azione di dispositivi meccanici opportuni quali ventilatori, per ricircolo d'aria opportunamente trattata, o mediante la combinazione di tutti questi fattori. In particolare, la ventilazione consiste *nell'introduzione intenzionale* di aria dall'esterno all'interno dell'edificio, mentre l'infiltrazione è il flusso d'aria esterna all'interno dell'edificio attraverso fessure ed altre aperture non intenzionali, e dovuto al normale uso di porte esterne per l'ingresso e l'uscita. Il tasso di ricambio orario n correla la portata d'aria al volume secondo Eq. 3.1.

$$n = \frac{\dot{V}}{V}$$

Eq. 3.1

La ventilazione naturale e l'infiltrazione sono dovute a differenze di pressione causate dal vento, e differenze di densità legate a differenze di temperatura tra l'aria interna ed esterna. Quest'ultimo fenomeno, detto effetto camino o stack effect, è causato principalmente dal grado di riscaldamento o raffreddamento che è presente all'interno dell'involucro edilizio, poiché è innescato dalla differenza di temperatura. L'aria calda e umida presenta una densità minore di quella non riscaldata: ciò genera il moto ascensionale. In presenza di permeabilità tra i piani, quest'aria può raggiungere le parti alte dell'edificio; per evitare una dispersione di calore è necessario impedire la fuoriuscita di questa massa d'aria causata dall'azione termica. Il vento è una forzante naturale e aleatoria la cui influenza è più marcata quanto meno l'edificio in questione è protetto da altre case o ostacoli naturali.

La pressione dovuta all'effetto camino è, assumendo che la temperatura e la pressione barometrica siano costanti all'altezza di interesse, esprimibile secondo Eq. 3.2:

$$p_{e.c.} = p_r - \rho g H$$

Eq. 3.2

dove

$p_{e.c.}$ pressione indotta dall'effetto camino [Pa]

p_r pressione di riferimento [Pa]

H altezza sul piano di riferimento [m]

Riguardo il vento, esso genera una distribuzione di pressione sulla superficie esterna dell'edificio che dipende dalla direzione e dalla velocità del vento, dalla densità dell'aria, dall'orientazione della superficie e dalle condizioni al contorno. La pressione dovuta al vento è data dall'equazione di Bernoulli in Eq. 3.3.

$$p_w = C_p \rho \frac{v^2}{2}$$

Eq. 3.3

p_w pressione indotta dall'azione del vento [Pa]

C_p coefficiente di superficie per la pressione indotta dal vento, adimensionale

Dunque, le differenze di pressione dovute al vento e all'effetto camino e generate dalla presenza di eventuali impianti meccanici sono considerate allo stesso tempo, e la portata d'aria attraverso le aperture è determinata in base alla differenza di pressione totale. Le aperture per la ventilazione naturale includono: finestre, porte, lucernari, caminetti controllati da valvole, aperture appositamente progettate per l'aspirazione o la mandata. La relazione che descrive il flusso d'aria attraverso una apertura si basa sull'equazione di Bernoulli e nella sua forma più generale è espressa da Eq. 3.4

$$\dot{V}_o = C_d A \sqrt{2 \Delta p / \rho}$$

Eq. 3.4

dove

- \dot{V}_O portata d'aria attraverso l'apertura [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]
 C_D coefficiente di scarico per le aperture, adimensionale, funzione della geometria dell'apertura e del numero di Reynolds
 A sezione trasversale dell'apertura [m^2]
 Δp differenza di pressione attraverso l'apertura [Pa]

In particolare, la portata d'aria causata dal solo effetto camino è esprimibile secondo Eq. 3.5,

$$\dot{V}_{e.c.} = f_{e.c.} A \sqrt{2g\Delta H \frac{\Delta T}{T_i}}$$

Eq. 3.5

dove

- $\dot{V}_{e.c.}$ portata d'aria dovuta al solo effetto camino [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 $f_{e.c.}$ fattore d'effetto camino, adimensionale
 ΔH Distanza tra il pavimento più basso (al massimo al livello del suolo, non si contano i sotterranei) e il soffitto dell'ambiente condizionato [m]
 ΔT differenza di temperatura tra interno ed esterno dell'ambiente condizionato [K]
 T_i Temperatura dell'ambiente interno [K]

mentre la portata d'aria causata dalla sola presenza del vento è esprimibile secondo Eq. 3.6.

$$\dot{V}_w = f_w A_0 v$$

Eq. 3.6

dove

- \dot{V}_w portata d'aria dovuta alla presenza del vento [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

f_w fattore di ventosità, adimensionale
 A_0 sezione libera dell'apertura [m^2]

Per un'analisi dettagliata del problema si rimanda a (ASHRAE, Ventilation and Infiltration, Chapter 27 2005).

3.2.1 *L'infiltrazione nel settore residenziale: metodi per la prova di pressurizzazione*

La permeabilità all'aria dell'edificio è la caratteristica principale dell'edificio stesso legata all'infiltrazione; negli ultimi anni il trend costruttivo per le nuove abitazioni va verso edifici maggiormente impermeabili cosicché l'infiltrazione sia ridotta (ASHRAE, Ventilation and Infiltration, Chapter 27 2005). La permeabilità all'aria di un edificio può essere misurata attraverso la prova di pressurizzazione, comunemente chiamata 'Blower Door Test', che viene qui di seguito richiamata secondo quanto riportato in (EN 13829:2002). La misura in questione prevede l'installazione, in corrispondenza di una porta o finestra esterna, di un ventilatore che induce una differenza di pressione attraverso l'involucro; la portata d'aria richiesta per mantenere questa differenza di pressione viene così misurata. E' possibile svolgere la prova secondo due diversi metodi: il metodo 'A', ed il metodo 'B'. Attraverso la prima delle due modalità, è testata la permeabilità all'aria dell'involucro quando esso è in configurazione d'uso quotidiano, ovvero quando lo stato dell'involucro stesso rappresenta le sue condizioni nella stagione in cui è utilizzato l'impianto di riscaldamento o l'impianto di raffrescamento. La prova in tal senso ha luogo con l'impianto di climatizzazione spento e con eventuali terminali per la ventilazione meccanica sigillati, con finestre e porte esterne chiuse, ma con i condotti della ventilazione naturale, previsti per legge, liberi. Il metodo B, invece, è prettamente diagnostico dell'edificio stesso: le aperture esistenti (finestre, porte etc.) sono chiuse, comprese quelle regolabili, le restanti aperture, ad esempio quelle per la ventilazione naturale, sono sigillate, gli impianti sono spenti, i terminali di impianto per la ventilazione meccanica sono sigillati. In questo modo è possibile individuare eventuali falle e difetti non previsti: in Fig. 3.2.1 si riportano alcuni esempi di individuazione dell'infiltrazione relativi a posa approssimativa degli infissi o a loro carenza progettuale.



Fig. 3.2.1: infiltrazione per posa degli infissi approssimativa o per loro carenza progettuale, fonte: Energy Saving Trust, “Improving airtightness in dwellings”.

Una volta installata l'apparecchiatura, si rileva la portata d'aria attraverso il ventilatore per una serie di cinque valori di differenza di pressione nell'intervallo tra ± 10 Pa e ± 100 Pa, o laddove non possibile raggiungere tali valori, la maggiore differenza di pressione deve essere in modulo di almeno 50 Pa, salvo le eccezioni specificate in (EN 13829:2002). Il risultato del Blower Door test, dunque, consiste in più valori di portata d'aria in corrispondenza di differenze di pressione: è raccomandabile disporre di una serie di misure in depressurizzazione e di un'altra serie in pressurizzazione. Il valore finale di portata che si raccomanda di ottenere deriva dalla curva di best fit dei dati rilevati (diagramma di infiltrazione d'aria) rispettivamente per la prova in depressurizzazione e pressurizzazione. La procedura che porta alla definizione del diagramma di infiltrazione d'aria è riassunta in EN 13829:2002; in Eq. 3.7 viene richiamata la forma della curva menzionata.

$$\dot{V}_L = C_L (\Delta p)^n$$

Eq. 3.7

dove

- \dot{V}_L portata di infiltrazione d'aria [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]
- C_L coefficiente di infiltrazione d'aria [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$]
- n esponente di portata d'aria, adimensionale

Ulteriori precisazioni sulla curva di Eq. 3.7 sono presenti in (ASHRAE, Ventilation and Infiltration, Chapter 27 2005). Vista la forma di Eq. 3.7, il diagramma di infiltrazione d'aria è solitamente riportato in scala bilogarithmica. Il risultato finale, ovvero la portata in corrispondenza di una differenza di pressione di riferimento, viene espresso in funzione di tre grandezze riguardanti l'edificio: il volume interno V , la superficie d'involucro A_E , la superficie netta del pavimento A_F . Il volume interno V è il volume di aria all'interno dell'edificio soggetto alla prova, e viene calcolato moltiplicando la superficie netta del pavimento per l'altezza media del soffitto. La superficie d'involucro A_E corrisponde all'area complessiva di tutti i pavimenti, pareti e soffitti che delimitano il volume interno sottoposto a prova, infine la superficie netta del pavimento A_F è la superficie totale di tutti i pavimenti che appartengono al volume interno soggetto a prova. In tal modo, i risultati che si ottengono riferiti ad una differenza di pressione di riferimento di 50 Pa sono espressi in Eq. 3.8, Eq. 3.9, Eq. 3.10.

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V}$$

Eq. 3.8

$$q_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_E}$$

Eq. 3.9

$$w_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_F}$$

Eq. 3.10

Poiché ciascuno di questi indici è disponibile sia per la prova in depressione che per quella in pressione, il risultato finale è costituito dalla media dei valori ottenuti dalle due prove.

Assumendo che la permeabilità di un edificio possa essere rappresentata da un foro equivalente, si può definire un'area effettiva (Sherman, 1987), ovvero ELA (effective leakage area) in corrispondenza di una certa pressione di riferimento, per caratterizzare la permeabilità dell'involucro secondo Eq. 3.11. In altri termini, l'ELA ricavata dalla misura su un edificio è

uguale all'area di un ugello equivalente perfetto attraverso cui, alla pressione di riferimento, fluirebbe la stessa portata che fluisce attraverso l'ELA.

$$ELA = \frac{\dot{V}_{\Delta p_{ELA}}}{(2\Delta p_{ELA} / \rho)^{1/2}}$$

Eq. 3.11

dove

$\dot{V}_{\Delta p_{ELA}}$ Portata d'aria attraverso l'ELA [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]

Δp_{ELA} differenza di pressione di riferimento per la valutazione dell'ELA [Pa]

Secondo il modello LBL, la differenza di pressione di riferimento per la valutazione dell'ELA, Δp_{ELA} , è pari a 4 Pa (ASHRAE, Ventilation and Infiltration, Chapter 27 2005), mentre secondo una convenzione canadese sarebbe di 10 Pa (si parla in questo caso di CEqLA, ovvero Canadian Equivalent Leakage Area) come riportato da Sherman in (Sherman, 1995). Questi valori di differenze di pressione hanno l'obiettivo di avvicinarsi a quelli che normalmente inducono lo scambio d'aria in un edificio. Tuttavia, essendo al di fuori dell'intervallo di valori misurati attraverso la prova, i valori di portata estrapolati corrispondenti sono soggetti ad una incertezza significativa (ASHRAE, Ventilation and Infiltration, Chapter 27 2005).

Secondo un'analisi dell'incertezza riportata in (Sherman e Palmiter, 1994), assumendo un'incertezza media di acquisizione della portata pari al 5% del valore letto, e un'incertezza assoluta di 2.5 Pa nella lettura della differenza di pressione, come riscontrato mediamente nella strumentazione comune per prove di Blower Door, l'incertezza sul risultato finale, ovvero sulla singola lettura a 50 Pa di differenza di pressione, sarebbe intorno al 7% del valore letto. Applicando le stesse voci di incertezza per il calcolo della portata a 4 Pa, come necessario per l'ELA, si otterrebbe un'incertezza di circa il 40% sulla lettura; tuttavia questo valore potrebbe essere migliorato attraverso un'analisi di regressione a partire da più punti rilevati. Per l'analisi dell'incertezza succitata si fa riferimento ad una distribuzione normale con intervallo di confidenza del 95%.

3.2.2 *La relazione tra permeabilità all'aria e infiltrazione*

L'infiltrazione è un fenomeno non lineare che dipende da un gran numero di caratteristiche dell'involucro e da forzanti naturali; una sua stima precisa è molto difficile ma esistono alcuni metodi in letteratura che mettono in relazione l'infiltrazione, descritta da n ovvero l'indice di ricambi orari, e la permeabilità all'aria, riconducibile a n_{50} relativo a una differenza di pressione di 50 Pa. In (Sherman, 1987) sono discussi alcuni di tali modelli, che sono qui richiamati. Il metodo più semplice, noto anche come metodo del 'diviso 20', è attribuito a Kronvall e Persily e stabilisce che una buona stima del tasso di infiltrazione annuale (ma secondo quanto riportato in (Sherman, 1995) è da considerarsi stagionale) possa essere raggiunta dividendo l' n_{50} per un fattore 20 come riportato in Eq. 3.12.

$$n_{K-P} = \frac{n_{50}}{20}$$

Eq. 3.12

dove

n_{K-P} tasso medio annuo di infiltrazione calcolato secondo il metodo di Kronvall e Persily [h^{-1}]

Persily elaborò anche un secondo modello per la valutazione dell'infiltrazione annuale (Sherman, 1987), descritto secondo Eq. 3.13:

$$n \approx \frac{n_{50}}{18} - 0.08$$

Eq. 3.13

Sebbene questa semplice espressione trascuri molti dettagli relativi al processo dell'infiltrazione, si ritiene che possa dare risultati qualitativamente ragionevoli per n medio annuo.

Sherman derivò inoltre, per la valutazione di n a partire dal dato misurato di n_{50} , un'espressione simile a quella del "diviso 20", con riferimento a case singole utilizzando i concetti inerenti la permeabilità dell'edificio (ELA) ed il modello dell'infiltrazione elaborato presso l'LBL (Lawrence Berkeley Laboratory) e richiamato in (Sherman, 1987). La correlazione tra

infiltrazione e permeabilità da lui ottenuta è riportata in Eq. 3.14; essa fa riferimento a case monofamiliari del Nord America.

$$n = \frac{n_{50}}{N} = \frac{n_{50}}{N_0 * c_{f1} * c_{f2} * c_{f3}}$$

Eq. 3.14

dove

- N rapporto tra infiltrazione e permeabilità per un'abitazione "tipo" della zona geografica e clima considerato, adimensionale
- N₀ media annuale dei valori di N, adimensionale
- c_{f1} fattore di correzione per l'altezza dell'edificio
- c_{f2} fattore di correzione per l'esposizione al vento
- c_{f3} fattore di correzione per la quantità e qualità delle fessure, tagli etc. presenti

N₀ presenta valori diversi secondo la zona geografica e dunque, il clima, ed è ricavato da un vasto database di misurazioni d'infiltrazione e di permeabilità. Sherman ha ottenuto il valore di tale coefficiente per le diverse zone geografiche dell'America del Nord e del Canada (Fig. 3.2.2). Per poter implementare questo metodo in Europa sarebbe necessario disporre di un ampio database di misurazioni per avere valori mediati e attendibili di N₀. I coefficienti c_f costituiscono una caratterizzazione della particolare abitazione che si considera, e sono riportati nelle seguenti Tab. 3.1, Tab. 3.2 e Tab. 3.3.

Numero di piani	1	1.5	2	3
c _{f1}	1.0	0.9	0.8	0.7

Tab. 3.1: valori del fattore di correzione per l'altezza dell'edificio.

Esposizione al vento	Ben protetta	In media	Esposta
c _{f2}	1.2	1.0	0.9

Tab. 3.2: valori del fattore di correzione per l'esposizione al vento.

Grandezza fessure	Piccole	Normali	Grandi
c_{f3}	1.4	1.0	0.7

Tab. 3.3: valori del fattore di correzione per la qualità e quantità delle fessure presenti nell'involucro.



Fig. 3.2.2: valori del rapporto tra infiltrazione e permeabilità per abitazioni del Nord America, fonte: (Sherman, 1987).

Esistono altri studi in letteratura, tra cui (Montoya, et al. 2010), in cui vengono discussi modelli per correlare permeabilità all'aria e infiltrazione; per gli obiettivi di questo lavoro si sono considerati i modelli finora riportati.

3.3 La strumentazione

La strumentazione utilizzata ai fini di questo lavoro è la Minneapolis *Blower Door* di *Energy Conservatory* di cui le Fig. 3.3.1, Fig. 3.3.2 e Fig. 3.3.3 riportano alcune immagini. In particolare la misura di portata d'aria avviene tramite un tubo di Pitot posto sulla sezione di mandata del ventilatore ed un acquisitore che rileva tale misura; allo stesso acquisitore sono collegate le sonde per la rilevazione della differenza di pressione tra ambiente interno ed esterno. E' da sottolineare che, grazie alla presenza di un anemometro che misura la velocità dell'aria, è possibile effettuare una fase di diagnosi dell'edificio per individuare le principali falle dell'involucro; impostando un valore di differenza di pressione costante si può verificare ad esempio che la posa in opera dei componenti sia avvenuta correttamente, e quali di questi siano i più delicati per apportare miglioramenti validi per il costruttore o l'installatore. In Fig. 3.3.4 sono riportate alcune immagini relative allo svolgimento della prova di blower door. Maggiori dettagli sulla strumentazione di misura sono forniti in (*Energy Conservatory 1 2006*) e (*Energy Conservatory 2 2006*).



Fig. 3.3.1: ventilatore assiale.



Fig. 3.3.2: data logger che rileva la misura di pressione tra interno ed esterno e la portata d'aria attraverso il ventilatore.



Fig. 3.3.3: termo-anemometro a filo caldo, per la misura di temperatura e l'indagine di velocità dell'aria.



(A)



(B)

Fig. 3.3.4: (A) esempio di installazione dell'apparecchiatura di blower door su una porta esterna, (B) esempio di sigillatura del condotto di ventilazione, da catalogo DFT.

In EN 13829:2002 sono specificate le caratteristiche che ogni singola apparecchiatura facente parte della catena di misura deve avere e sono qui di seguito richiamate. Riguardo le misure di pressione, 'lo strumento deve essere in grado di misurare differenze di pressione con un'accuratezza di ± 2 Pa nel campo di valori tra 0 Pa e 60 Pa; lo strumento di misura della portata d'aria deve essere in grado di misurare entro $\pm 7\%$ della lettura; infine, lo strumento per la misura della temperatura deve essere in grado di misurare la temperatura con un'accuratezza di ± 1 K' (EN 13829:2002). Per quanto riguarda l'accuratezza per la misura di portata d'aria, essa non è specificata adeguatamente nelle informazioni disponibili dal costruttore (Energy Conservatory 1 2006) e (Energy Conservatory 2 2006), dunque ai fini di quest'analisi si considerano gli intervalli definiti in (EN 13829:2002) e sopra riportati.

Per quanto riguarda l'analisi dell'incertezza, seguendo le informazioni sopra menzionate in (EN 13829:2002) e quanto riportato in (Sherman e Palmiter, 1994) e in (ISO GUIDE 1995), e assumendo per le grandezze di ingresso un'intervallo di confidenza pari al 95%, si riporta l'informazione sull'incertezza combinata per singola lettura a 50 Pa di differenza di pressione di riferimento, ottenuta considerando un'incertezza del 5% sulla definizione di V , A_E e A_F . Si è assunto inoltre, in conformità con (ISO GUIDE 1995), che l'informazione di incertezza considerata per le letture di portata e differenza di pressione sia di tipo B, in quanto quella di tipo A è risultata trascurabile (lo strumento restituisce la media di un numero sufficientemente elevato di letture in un intorno del valore considerato di ampiezza ristretta). Nelle Eq. 3.15, Eq. 3.16, ed Eq. 3.17 è riportato il calcolo dell'incertezza per ciascuno degli indici derivanti dalla prova in pressurizzazione ($u(n_{50press})$, $u(q_{50press})$, $u(w_{50press})$): analoga operazione è compiuta per la prova in depressurizzazione. In Eq. 3.18 si riporta l'incertezza $u(n_{50tot})$ ottenuta considerando la media dei valori di n_{50} derivanti dalle prove di pressurizzazione e depressurizzazione; un'espressione analoga si ottiene per $u(q_{50})$ e $u(w_{50})$.

$$u^2(n_{50press}) = \left(\frac{1}{V}\right)^2 \cdot u^2(\dot{V}_{50}) + \left(-\frac{\dot{V}_{50}}{V^2}\right)^2 \cdot u^2(V)$$

Eq. 3.15

$$u^2(q_{50press}) = \left(\frac{1}{A_E}\right)^2 \cdot u^2(\dot{V}_{50}) + \left(-\frac{\dot{V}_{50}}{A_E^2}\right)^2 \cdot u^2(A_E)$$

Eq. 3.16

$$u^2(w_{50press}) = \left(\frac{1}{A_F}\right)^2 \cdot u^2(\dot{V}_{50}) + \left(-\frac{\dot{V}_{50}}{A_F^2}\right)^2 \cdot u^2(A_F)$$

Eq. 3.17

$$u(n_{50tot}) = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot u^2(n_{50depress}) + \frac{1}{4} \cdot u^2(n_{50press})}$$

Eq. 3.18

In tal modo, l'incertezza su n_{50} , q_{50} e w_{50} , riferita alla lettura del singolo valore di differenza di pressione come da (Sherman e Palmiter, 1994), risulta di circa l'8.5% sul valore letto con intervallo di confidenza pari al 95%. Nei grafici delle sezioni successive si considererà solo l'incertezza su n_{50} , q_{50} e w_{50} secondo le modalità sopra definite.

3.4 Risultati di una campagna di misure

In questo capitolo si discutono i risultati di una campagna di misura del 2008-2010 su edifici in Veneto: in particolare, sono stati sottoposti a prova 32 appartamenti, 4 case a schiera ed una casa singola. Per ogni unità sono state eseguite due prove, una in pressurizzazione ed una in depressurizzazione, i risultati qui di seguito esposti si riferiscono al valore medio. Per alcune unità si dispone sia della prova eseguita secondo metodo A che di quella secondo metodo B; tutte le prove sono state svolte in conformità a EN 13829:2002. Gli edifici sono classificati come case singole, a schiera ed appartamenti; i risultati sono ordinati in base a valori di n_{50} crescenti. In Tab. 3.4 e Tab. 3.5 si riporta il riassunto dei risultati di tutte le prove con il metodo A e metodo B: per ciascuna tabella, i valori di V_{50} , n_{50} , w_{50} , q_{50} , CEqLA, ELA sono relativi alla media della prova in pressurizzazione e depressurizzazione. In Fig. 3.4.1 e Fig. 3.4.2 sono riportati i risultati delle prove con il metodo A per gli appartamenti testati; in Fig. 3.4.4 e Fig. 3.4.5 quelli per case a schiera. Per quanto riguarda il solo caso testato di casa singola si faccia riferimento a Tab. 3.4. In Fig. 3.4.7 e Fig. 3.4.8 si riportano i risultati delle prove con metodo B per gli appartamenti testati, per quanto riguarda le case a schiera testate con metodo B si faccia riferimento a Tab. 3.5. Le Fig. 3.4.3, Fig. 3.4.6, riportano l' n_{50} e l'ELA degli edifici testati in funzione del perimetro degli infissi per le prove con metodo per appartamenti e case a schiera, la Fig. 3.4.9 riporta n_{50} ed ELA degli appartamenti testati in funzione del perimetro degli infissi per le prove con metodo B. Gli appartamenti 1, 6 e 17, e le case a schiera 1 e 2 sono dotati di impianto di ventilazione meccanica controllata.

Nei grafici che seguono l'incertezza di misura è riportata per n_{50} , q_{50} e w_{50} secondo quanto definito in Sez. 3.3.

anno di costruzione	tipo di edificio	N ID	V [m ³]	A _F [m ²]	A _E [m ²]	V ₅₀ [m ³ ·h ⁻¹]	n ₅₀ [h ⁻¹]	w ₅₀ [m ³ ·h ⁻¹ ·m ⁻²]	q ₅₀ [m ³ ·h ⁻¹ ·m ⁻²]	CEqLA 10 Pa [cm ²]	LBL ELA 4 Pa [cm ²]
2009	SCH	1	359	126	382	440	1.23	3.49	1.15	167	88
2009	SCH	2	359	126	382	440	1.25	3.55	1.17	175	93
1970*	S	1	570	190	440	968	1.70	5.10	2.20	324	158
2007	A	1	457	92	325	905	1.98	9.83	2.78	377	208
2008*	A	2	214	55	153	460	2.17	8.44	3.03	194	107
2008*	A	3	185	66	238	442	2.39	6.70	1.86	177	95
2007	A	4	369	143	318	1006	2.73	7.03	3.17	415	227
2008*	A	5	185	66	238	507	2.74	7.68	2.13	213	118
2008	A	6	397	147	403	1135	2.86	7.72	2.82	491	272
2008*	A	7	185	66	238	553	2.99	8.37	2.33	238	133
2007	A	8	161	60	238	482	3.00	8.10	2.02	206	115
2008*	A	9	153	55	214	462	3.02	8.46	2.16	197	110
2007	A	10	231	86	294	732	3.17	8.56	2.49	311	173
2007	A	11	186	69	248	626	3.36	9.05	2.52	282	163
2007	A	12	195	72	257	660	3.37	9.11	2.57	272	149
2007	A	13	166	61	213	572	3.46	9.33	2.68	258	149
2007	A	14	326	118	310	1171	3.59	9.90	3.78	485	266
2008	SCH	3	584	214	588	2155	3.69	10.05	3.67	970	558
2007	A	15	180	67	244	703	3.91	10.54	2.88	309	175
2008	SCH	4	584	214	588	2460	4.21	11.48	4.19	1095	626
2007	A	16	197	73	248	863	4.38	11.80	3.48	378	214
2008	A	17	362	121	341	1604	4.43	13.22	4.71	699	395
2007	A	18	129	48	211	572	4.43	11.96	2.72	266	156
2007	A	19	276	108	434	1338	4.84	12.39	3.09	557	307
2008*	A	20	143	53	200	716	4.99	13.63	3.58	308	173
2007	A	21	260	103	274	1482	5.70	14.41	5.42	632	353
2007	A	22	237	93	260	1410	5.96	15.13	5.42	583	320
2008	A	23	222	74	293	1370	6.17	18.41	4.68	576	319
2008*	A	24	143	53	200	895	6.24	17.06	4.48	390	220
2008*	A	25	143	53	200	948	6.61	18.06	4.74	427	246
2008	A	26	280	105	311	1883	6.73	17.98	6.06	841	482
2008	A	27	222	69	269	1504	6.77	21.95	5.60	658	372
2007	A	28	260	100	340	1788	6.88	17.88	5.26	735	402
1961	A	29	330	110	303	2363	7.16	21.48	7.80	982	540
2008	A	30	280	105	311	2139	7.64	20.43	6.88	984	573
2008	A	31	222	69	269	1821	8.21	26.58	6.78	891	540
1980	A	32	236	87	264	2055	8.71	23.54	7.79	892	503

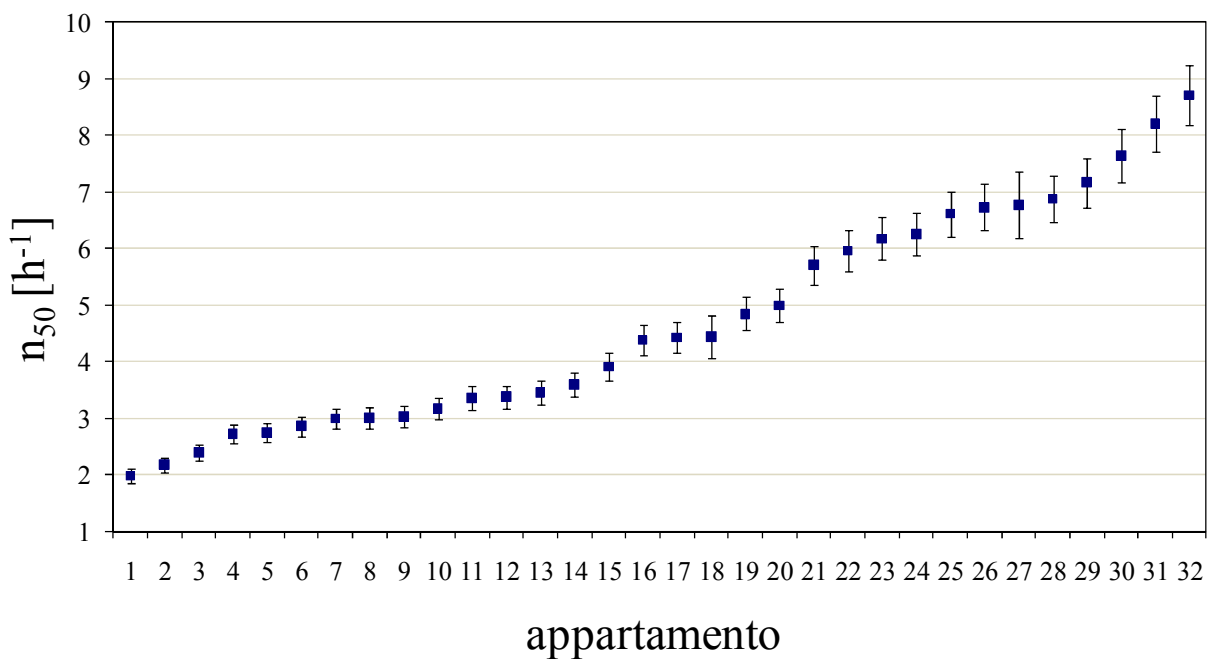
*Unità riqualificate, A = appartamento, SCH = casa a schiera, S = casa singola.

Tab. 3.4: riassunto dei risultati delle prove di Blower Door con metodo A; media dei valori delle prove di pressurizzazione e depressurizzazione.

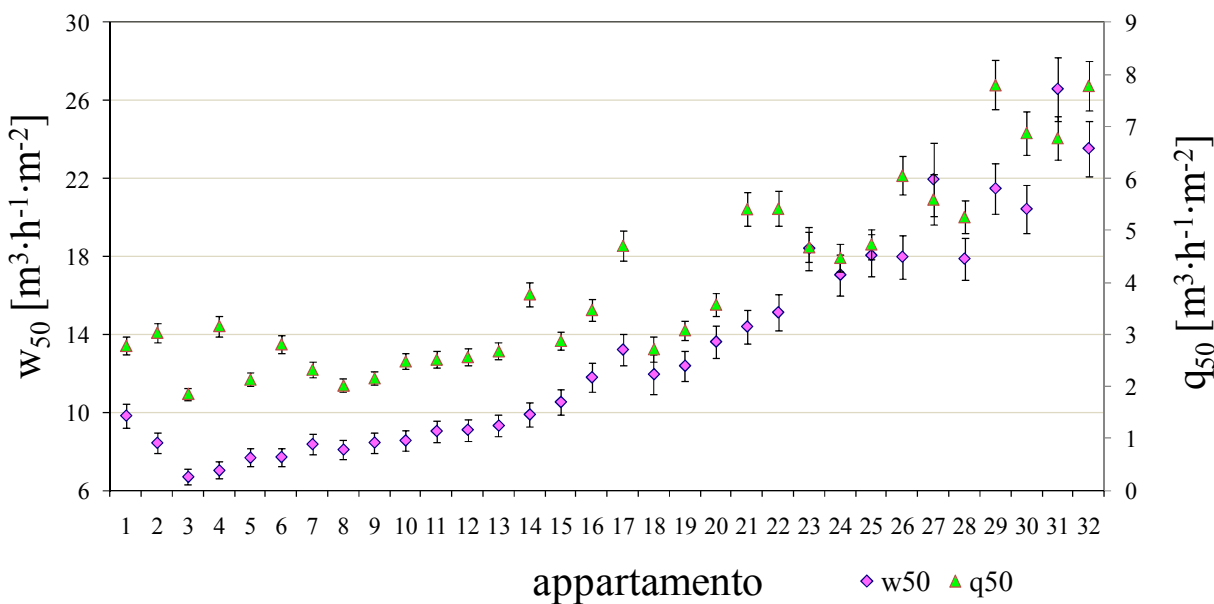
anno di costruzione	tipo di edificio	N ID	V [m ³]	A _F [m ²]	A _E [m ²]	V ₅₀ [m ³ ·h ⁻¹]	n ₅₀ [h ⁻¹]	W ₅₀ [m ³ ·h ⁻¹ ·m ⁻²]	q ₅₀ [m ³ ·h ⁻¹ ·m ⁻²]	CEqLA @ 10 Pa [cm ²]	LBL ELA @ 4 Pa [cm ²]
2009	SCH	2	359	126	440	314	0.87	2.49	0.82	114	58
2009	SCH	1	359	126	440	349	0.97	2.77	0.91	127	65
2007	A	1	457	92	325	540	1.18	5.87	1.66	201	104
2008*	A	2	214	55	153	257	1.20	4.66	1.68	103	55
2008	A	6	397	147	403	549	1.38	3.73	1.36	198	101
2008*	A	3	185	66	238	264	1.43	4.00	1.11	104	55
2008*	A	9	153	55	214	269	1.76	4.93	1.26	111	60
2008*	A	5	185	66	238	350	1.89	5.30	1.47	141	76
2008*	A	7	185	66	238	364	1.97	5.52	1.53	148	80
2008	A	17	362	121	341	1377	3.80	11.35	4.04	576	318
2008*	A	20	143	53	200	646	4.51	12.31	3.23	274	152
2008*	A	24	143	53	200	826	5.76	15.73	4.13	358	202
2008*	A	25	143	53	200	875	6.10	16.67	4.38	396	229

*Unità riqualificate, A = appartamento, SCH = casa a schiera, S = casa singola.

Tab. 3.5: riassunto dei risultati delle prove di Blower Door con metodo B; media dei valori delle prove di pressurizzazione e depressurizzazione.



(A)



(B)

Fig. 3.4.1: risultati delle misure di Blower Door per appartamenti, media dei valori delle prove di pressurizzazione e depressurizzazione, metodo A - (A) grafico dell'n₅₀, (B) grafico di w₅₀ e q₅₀.

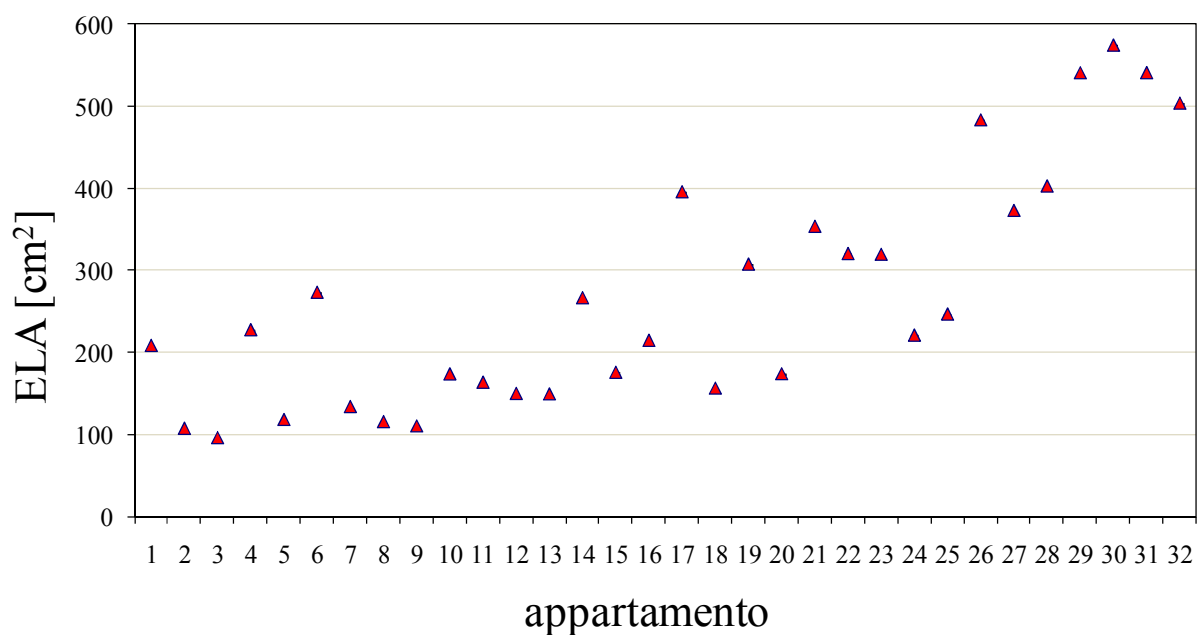
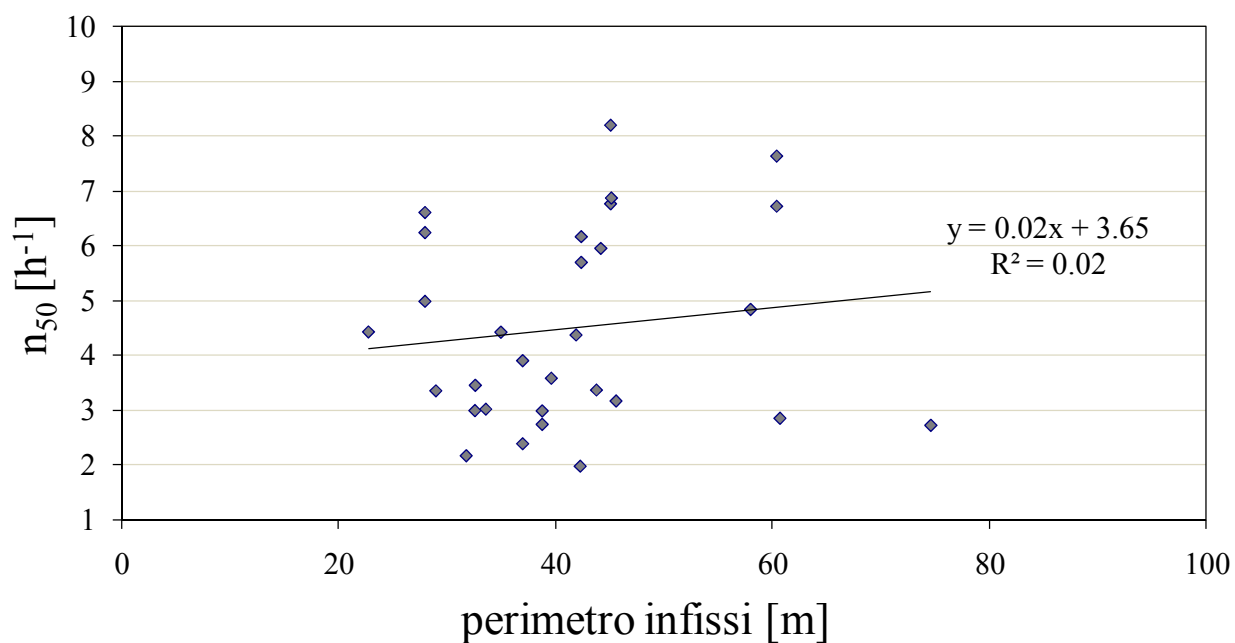
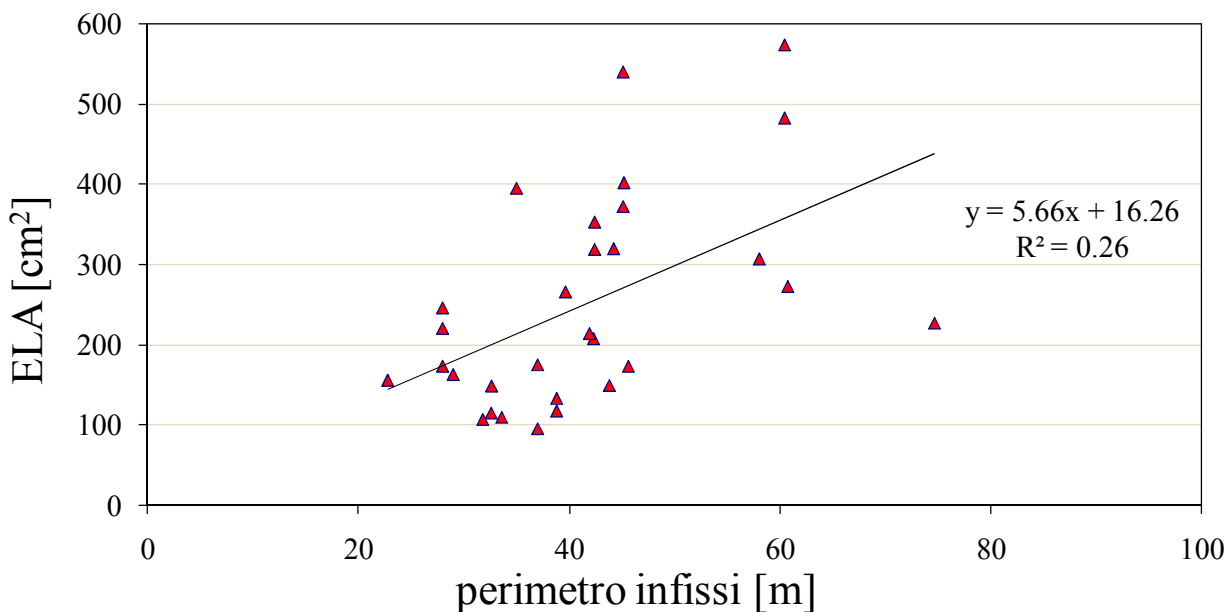


Fig. 3.4.2: risultati delle misure di Blower Door per appartamenti, media dei valori delle prove di pressurizzazione e depressurizzazione, metodo A - grafico dell' LBL ELA a 4 Pa.

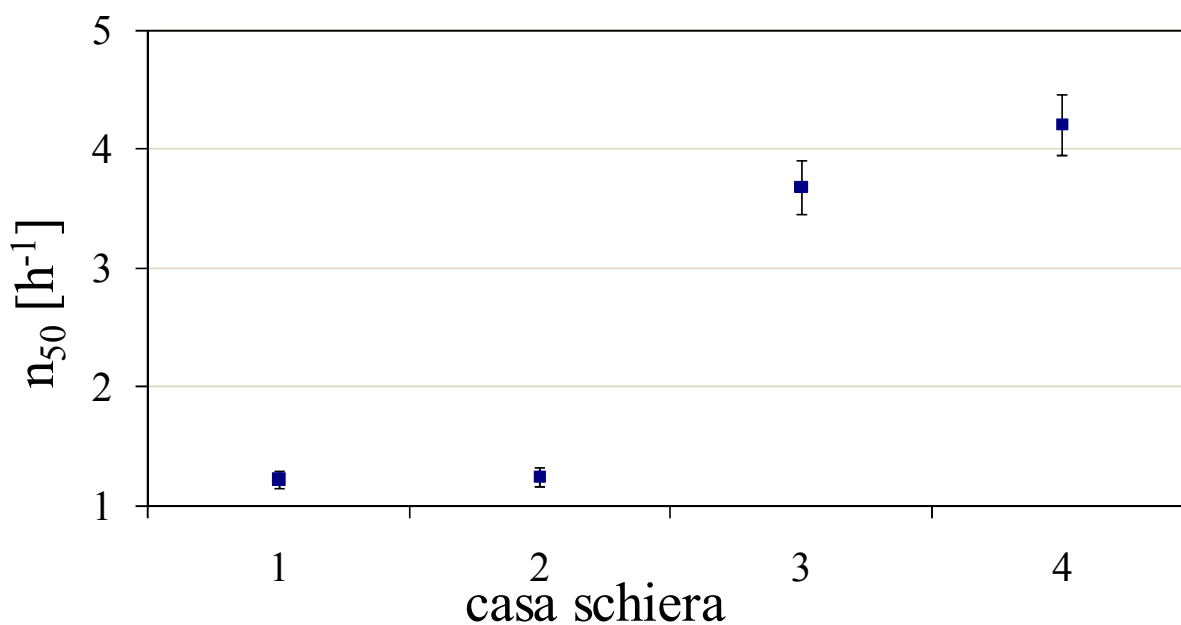


(A)



(B)

Fig. 3.4.3: risultati delle misure di Blower Door per appartamenti, media dei valori delle prove di pressurizzazione e depressurizzazione, metodo A – (A) grafico dell' n_{50} in funzione del perimetro degli infissi, (B) grafico dell'ELA in funzione del perimetro degli infissi



(A)

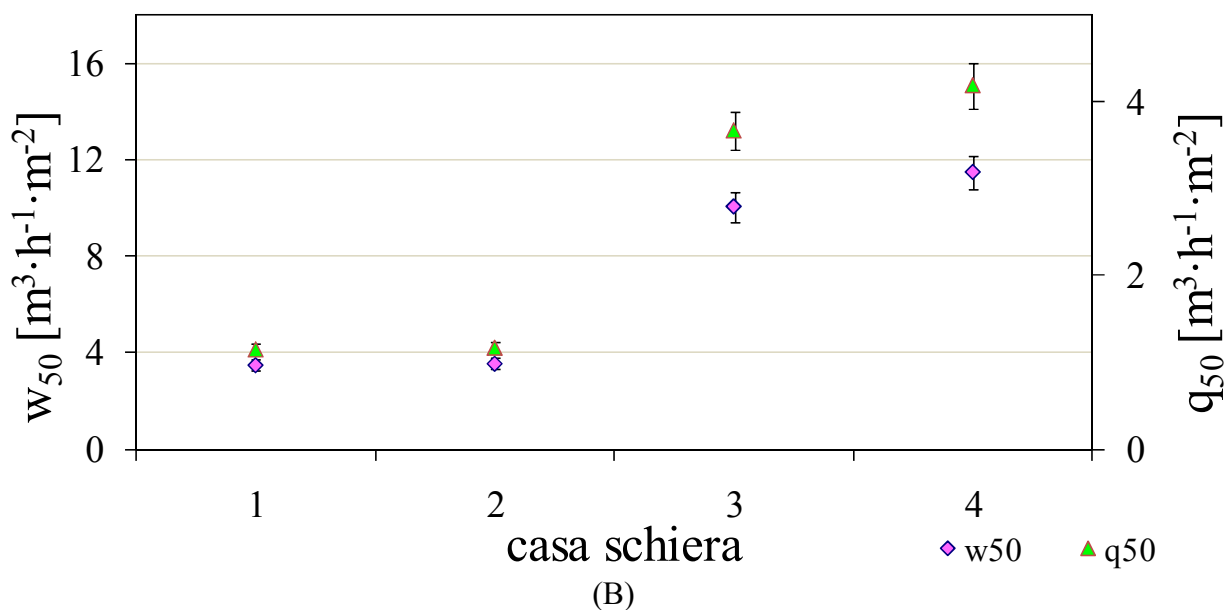


Fig. 3.4.4: risultati delle misure di Blower Door per case a schiera, media dei valori delle prove di pressurizzazione e depressurizzazione, metodo A - (A) grafico dell'n₅₀, (B) grafico di w₅₀ e q₅₀.

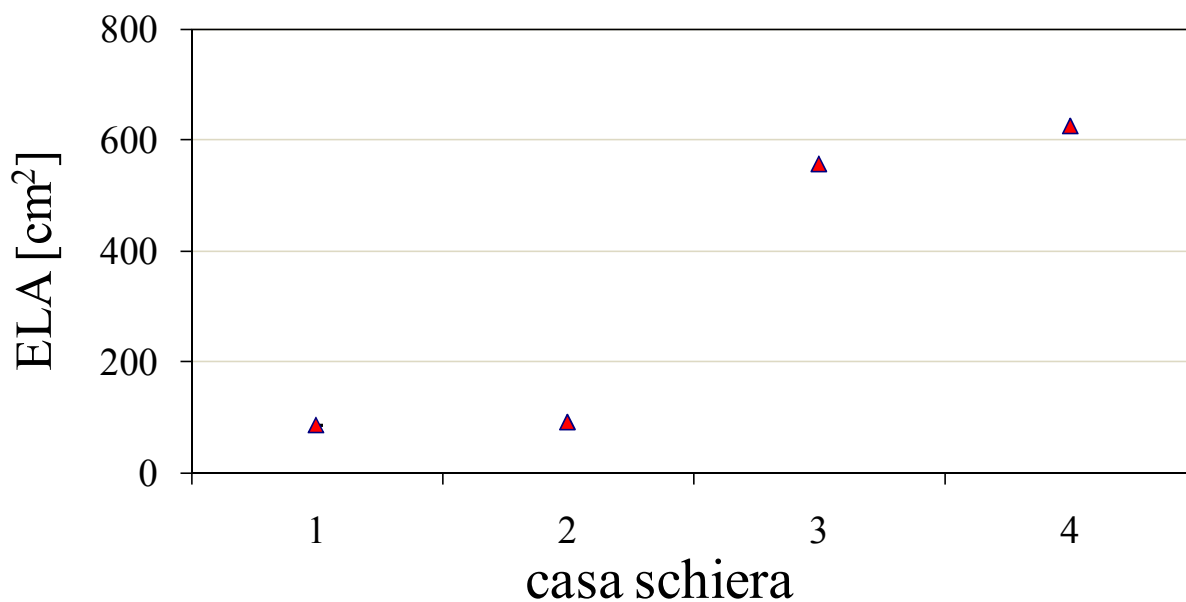


Fig. 3.4.5: risultati delle misure di Blower Door per case a schiera, media dei valori delle prove di pressurizzazione e depressurizzazione, metodo A - grafico dell'LBL ELA a 4 Pa.

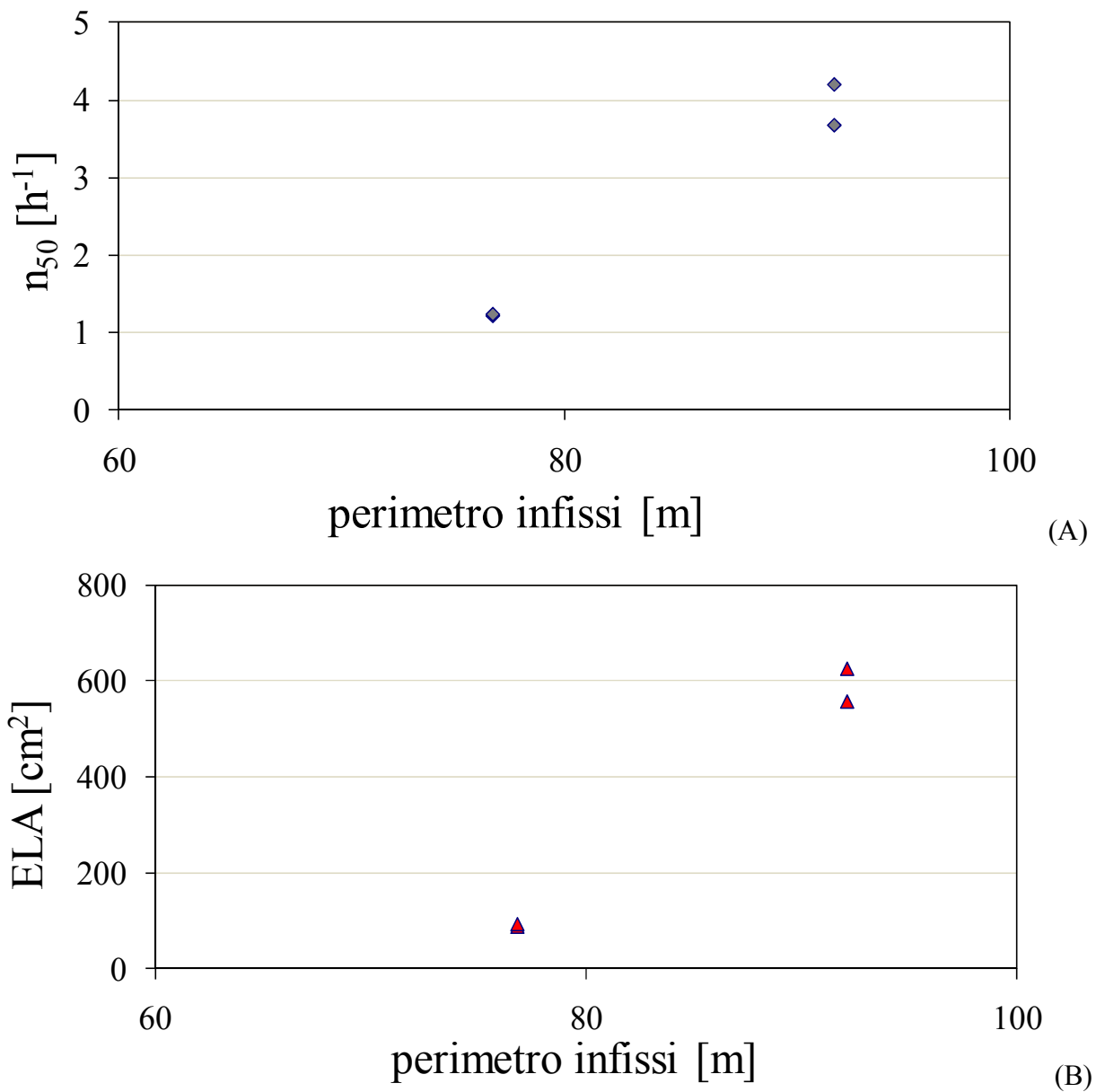
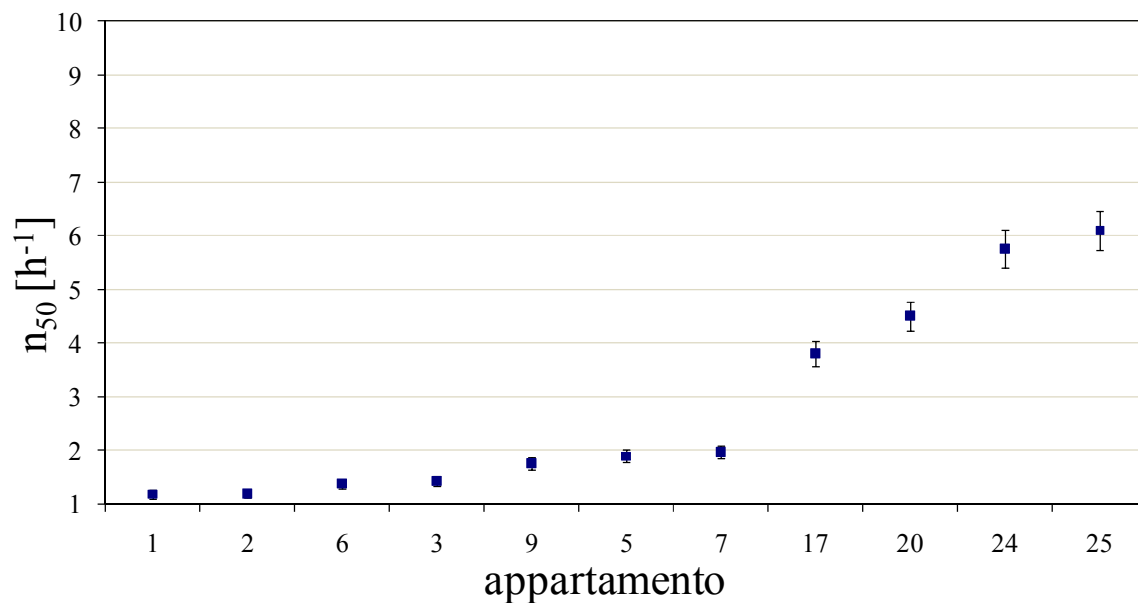
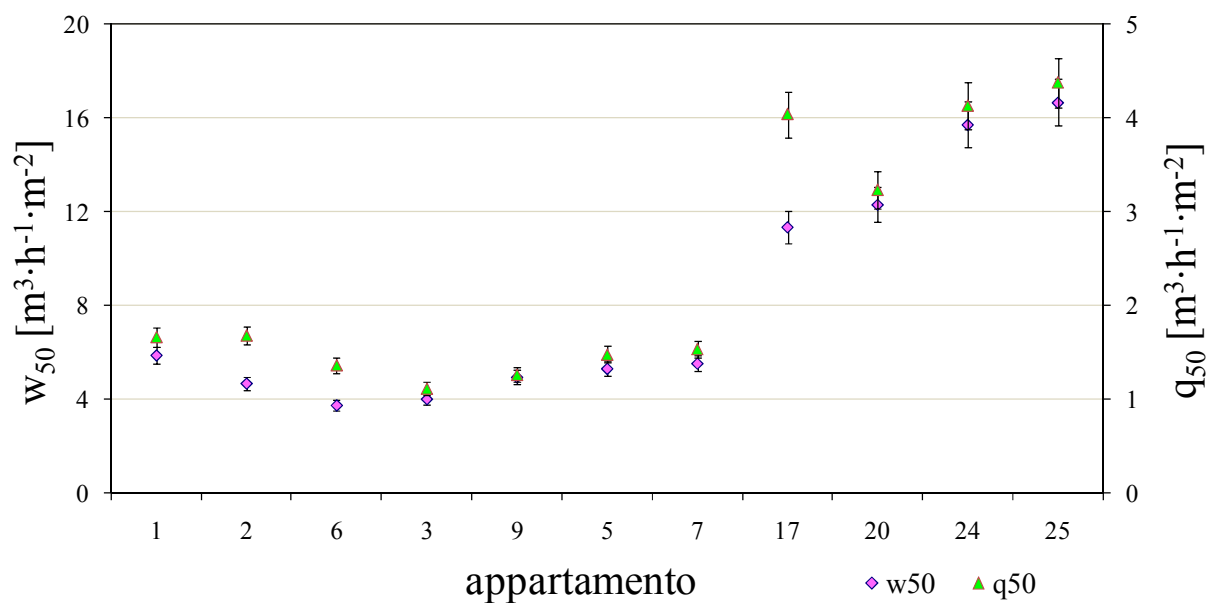


Fig. 3.4.6: risultati delle misure di Blower Door per case a schiera, media dei valori delle prove di pressurizzazione e depressurizzazione, metodo A – (A) grafico dell' n_{50} in funzione del perimetro degli infissi, (B) grafico dell'ELA in funzione del perimetro degli infissi



(A)



(B)

Fig. 3.4.7: risultati delle misure di Blower Door per appartamenti, media dei valori delle prove di pressurizzazione e depressurizzazione, metodo B - (A) grafico dell' n_{50} , (B) grafico di w_{50} e q_{50} .

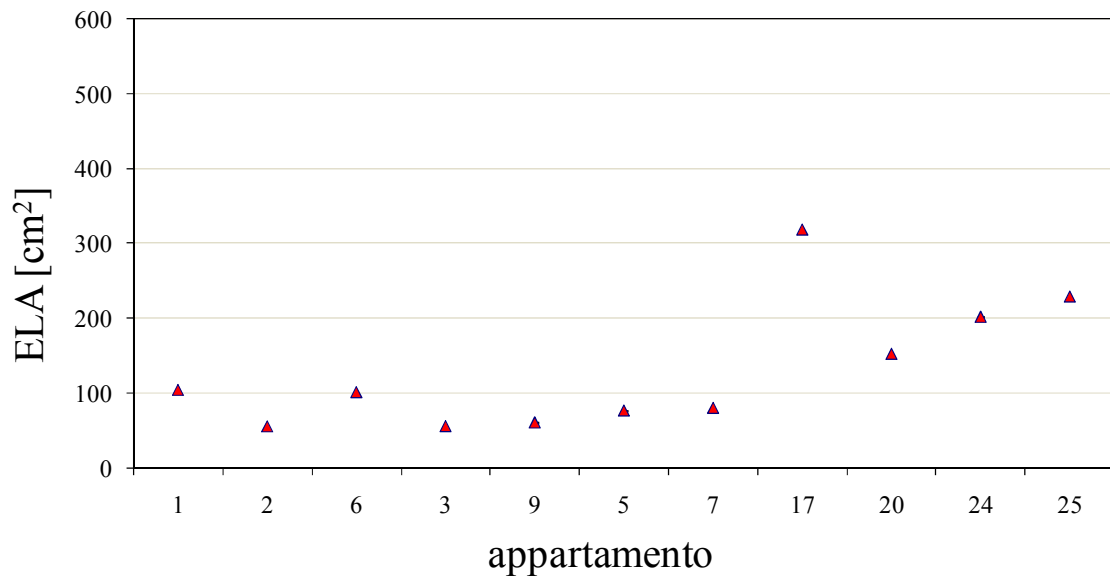
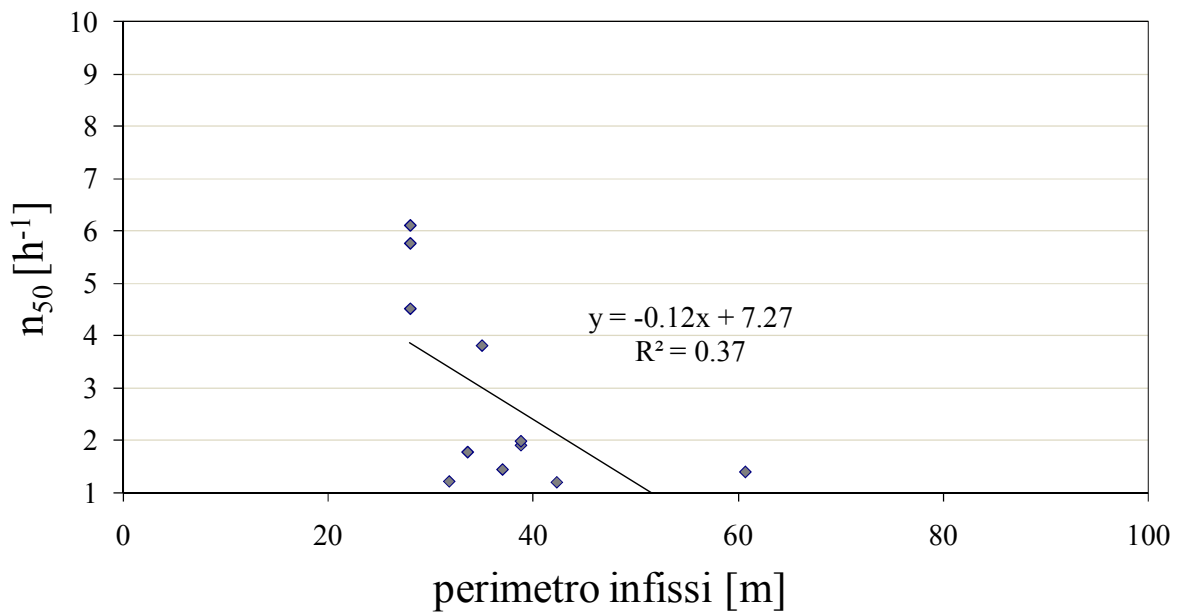


Fig. 3.4.8: risultati delle misure di Blower Door per appartamenti, media dei valori delle prove di pressurizzazione e depressurizzazione, metodo B - grafico dell'LBL ELA a 4 Pa.



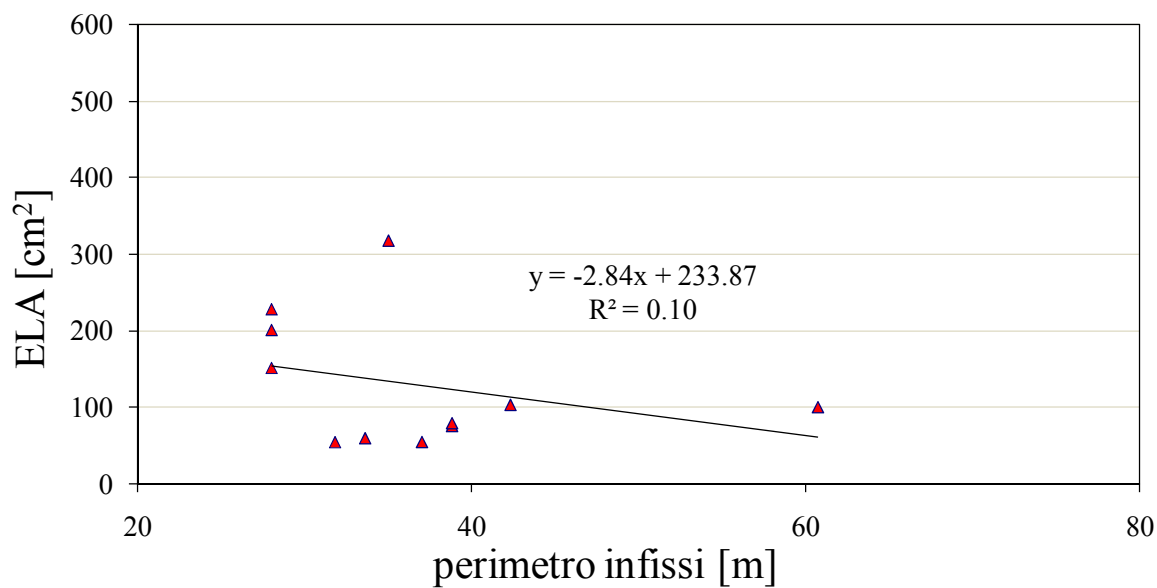


Fig. 3.4.9: risultati delle misure di Blower Door per case a schiera, media dei valori delle prove di pressurizzazione e depressurizzazione, metodo B – (A) grafico dell' n_{50} in funzione del perimetro degli infissi, (B) grafico dell'ELA in funzione del perimetro degli infissi.

3.5 Discussione dei risultati

3.5.1 Prove con metodo A

In (EN ISO 13789:2007), e richiamato in Fig. 3.5.1, è riportato un criterio per la classificazione degli edifici in base al valore di n_{50} misurato. In alcuni Paesi in Europa sono imposti valori limite di n_{50} per gli edifici; a titolo di esempio in Tab. 3.6 sono citati quelli relativi a normativa tedesca e della Repubblica Ceca.

Air change rate at 50 Pa n_{50} h^{-1}		Envelope tightness level
Multi-family buildings	Single-family buildings	
Fewer than 2	Fewer than 4	High
2 to 5	4 to 10	Medium
More than 5	More than 10	Low

Fig. 3.5.1: classificazione degli edifici in base a n_{50} secondo EN ISO 13789:2007.

Descrizione della tipologia d'edificio o impianto	n_{50} [h^{-1}]
Senza ventilazione meccanica (ventilazione naturale) [DIN 4108-7: 2001-08]	3
Con aspirazione meccanica dell'aria senza recupero di calore [DIN 4108-7: 2001-08] (CSN 73 0540)	1.5
Aspirazione ed alimentazione guidata con recupero di calore (CSN 73 0540)	1
Case passive (CSN 73 0540)	0.6
Limite massimo per tutti gli edifici (CSN 73 0540)	4.5

Tab. 3.6: Valori limite di n_{50} imposti in Germania (DIN) e Repubblica Ceca (CSN).

Secondo la distinzione in Fig. 3.5.1 (EN ISO 13789:2007), gli appartamenti testati si ripartiscono come nell'istogramma di Fig. 3.5.2. Il 59 % degli appartamenti, dunque la maggioranza, si può ritenere mediamente permeabile, mentre solo il 3 % è ad alta impermeabilità ed il restante 38 % è a bassa impermeabilità. L'indagine, come evidenziato in Tab. 3.4, ha riguardato per lo più edifici di nuova costruzione; soltanto gli appartamenti 29 e 32 sono più vecchi, rispettivamente del 1961, e del 1980, e si collocano tra gli edifici più permeabili. Gli appartamenti contrassegnati

dal simbolo * in Tab. 3.4 sono stati interessati da interventi di riqualificazione energetica e si ripartiscono tra le unità mediate e a bassa impermeabilità.

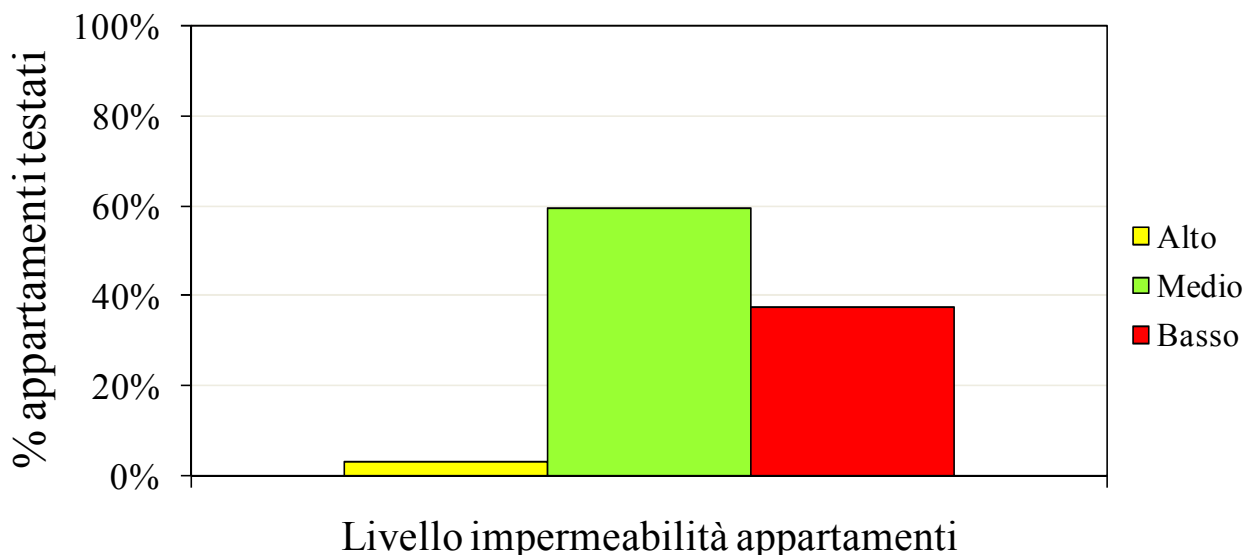


Fig. 3.5.2: livello di impermeabilità degli appartamenti testati secondo i criteri in EN ISO 13789:2007.

Per quanto riguarda le case a schiera, tutte di nuova costruzione, due delle quattro unità testate si collocano nella fascia di alta tenuta, due in quella media.

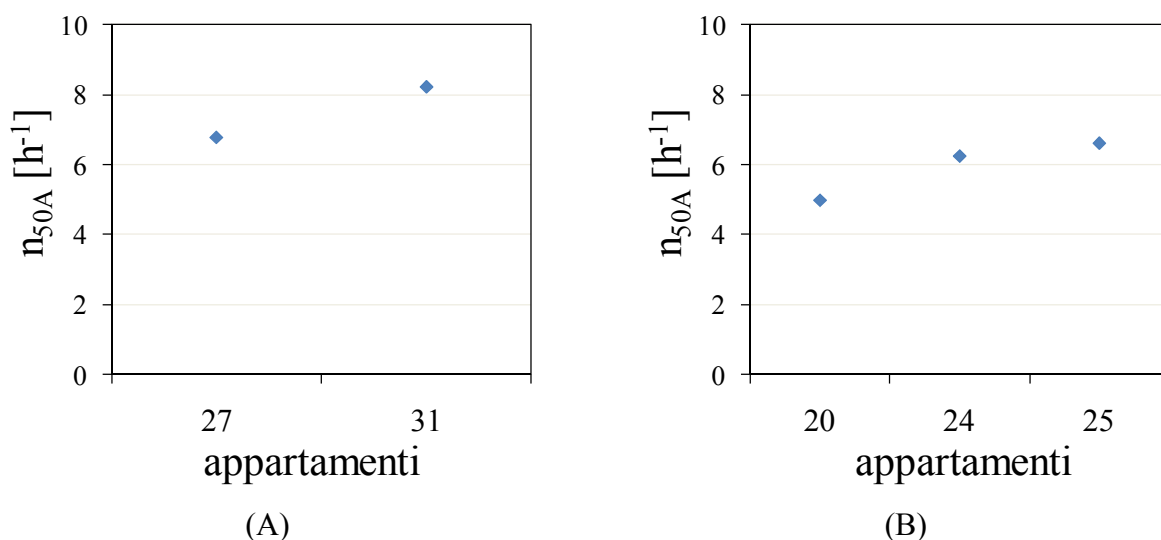
Infine, la casa singola testata è ad alta impermeabilità; si tratta di un edificio interessato da riqualificazione energetica, in particolare sono state montate controfinestre a telaio fisso, ed i cassonetti degli avvolgibili sono stati resi impermeabili.

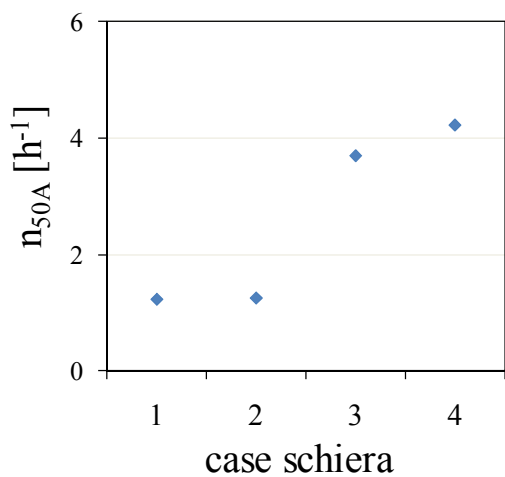
Per quanto riguarda le unità dotate di impianto di ventilazione meccanica controllata, facendo riferimento ai valori di Tab. 3.6 si avrebbe che solo le case a schiera 1 e 2 presentano un valore di n_{50} inferiore a quello prescritto, mentre le altre unità hanno un valore di n_{50} superiore. Dunque il funzionamento ottimale dell'impianto di ventilazione meccanica controllata, secondo i criteri di Tab. 3.6, sarebbe garantito solo per le case a schiera 1 e 2, poiché per gli altri casi l'apporto dovuto alla ventilazione naturale risulta rilevante.

Per quanto riguarda gli indici q_{50} e w_{50} per gli appartamenti, si vede in Fig. 3.4.1 come questi non seguano l'ordinamento crescente di n_{50} ; ciò deriva dalla particolare conformazione di ciascuna unità, e dunque dai valori di V , A_E , A_F , poiché la portata d'aria considerata è la stessa per tutti gli indici. Per le case a schiera di Fig. 3.4.4, l'andamento degli indici q_{50} e w_{50} segue quello di n_{50} , poiché le unità sono a due a due identiche.

Come evidenziano le Fig. 3.4.3 e Fig. 3.4.6, non sembra esistere una correlazione tra n_{50} ed ELA per le prove con metodo A e perimetro degli infissi.

Per quanto riguarda i valori di permeabilità misurati in unità diverse ma facenti parte di uno stesso lotto costruttivo, gli appartamenti 20, 24 e 25 sono identici e fanno parte della stessa palazzina, ma sono posizionati in piani diversi: la palazzina è formata da tre piani, l'edificio 20 si trova al secondo piano, il 24 al primo, il 25 all'ultimo. Dalle misure risulta che l'appartamento al piano intermedio è il meno permeabile, mentre l' n_{50} aumenta in corrispondenza dell'unità al piano terra (confinante con scantinati e garage non riscaldati) e dell'unità al piano superiore, sulla quale vi è il tetto. In particolare, l' n_{50} per le unità 24 e 25 presenta un aumento relativo del 25% e 32% rispetto l' n_{50} dell'unità 20. Gli appartamenti 27 e 31, invece, sono sullo stesso livello, hanno la stessa esposizione al vento e le stesse dimensioni, ma i valori di n_{50} sono consistentemente diversi, in particolare l' n_{50} dell'appartamento 31 presenta un aumento relativo di circa il 21% rispetto a quello dell'unità 27. Per le case a schiera 3 e 4, anch'esse identiche, sullo stesso livello e con la stessa esposizione al vento, vale quanto asserito in precedenza, ovvero si riscontrano valori di permeabilità consistentemente diversi, con n_{50} dell'unità 4 che presenta un aumento relativo di circa il 14% rispetto quello dell'unità 3. Per le case a schiera 1 e 2, invece, sullo stesso livello e con la stessa esposizione al vento, si sono rilevati valori di n_{50} molto simili (circa 1.2 h^{-1} per entrambe), con un aumento relativo di circa il 2% per l' n_{50} dell'unità 2 rispetto a quello riscontrato in 1: questo potrebbe evidenziare la stessa cura nella costruzione da parte di maestranze sicuramente molto abili. Il riassunto dei valori di n_{50} delle unità ora elencate è riportato in Fig. 3.5.3.





(C)

Fig. 3.5.3: confronto di n_{50} derivante da misura con metodo A per unità identiche – (A) confronto tra gli appartamenti 27 e 31, (B) confronto tra gli appartamenti 20, 24 e 25, (C) confronto tra le case a schiera 1 e 2 e tra le case a schiera 3 e 4.

3.5.2 Prove con metodo B

La Fig. 3.5.4 riporta la variazione relativa di n_{50} riscontrata per gli appartamenti da prove con metodo A e B; le unità sono ordinate per valori crescenti di n_{50} ottenuti da prova con metodo B. I valori in Fig. 3.5.4 indicano l'influenza sull'impermeabilità dell'edificio, delle aperture per la ventilazione naturale, ovvero tipicamente il foro per il gas e quello della cappa della cucina quando non dotato di valvola che ne regoli la chiusura.

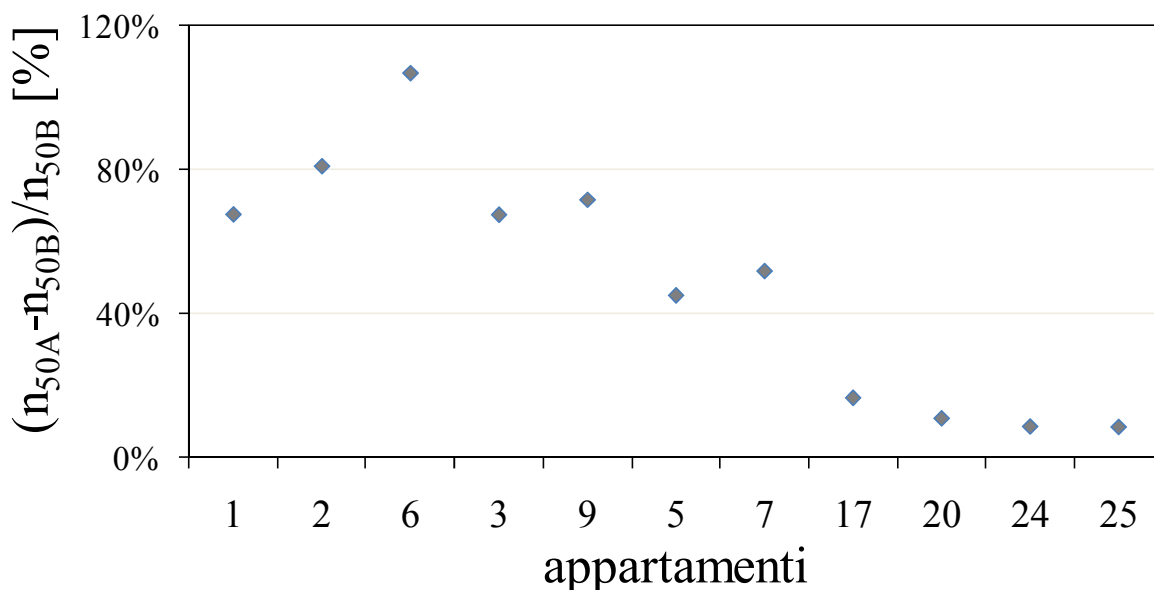


Fig. 3.5.4: scostamenti relativi di n_{50} tra le prove con metodo A e metodo B per appartamenti.

Dall'esame di Fig. 3.5.4 si vede come la presenza delle aperture per la ventilazione naturale (ovvero il passaggio da prova con metodo B a prova con metodo A) causi un incremento relativo medio dell'indice n_{50} di circa il 70 % (con il picco di circa 110%) per le unità nel diagramma fino alla 7, le quali sono contraddistinte da valori di n_{50} inferiori a 3 h^{-1} per n_{50A} , e a 2 h^{-1} per n_{50B} . Le unità 17, 20, 24 e 25 hanno valori di n_{50A} compresi tra 4 h^{-1} e 7 h^{-1} , e valori di n_{50B} compresi tra circa 4 h^{-1} e 6 h^{-1} ; per questi casi, l'incremento relativo medio di n_{50} ottenuto da prova con metodo A rispetto quello ottenuto da prova con metodo B è di circa il 10%. Per quanto riguarda le case a schiera, l'incremento relativo di n_{50} , rilevato con prove con metodo A rispetto a quelle con metodo B, è per l'unità 1 di circa il 27%, mentre per la 2 tale valore ammonta a circa il 44%.

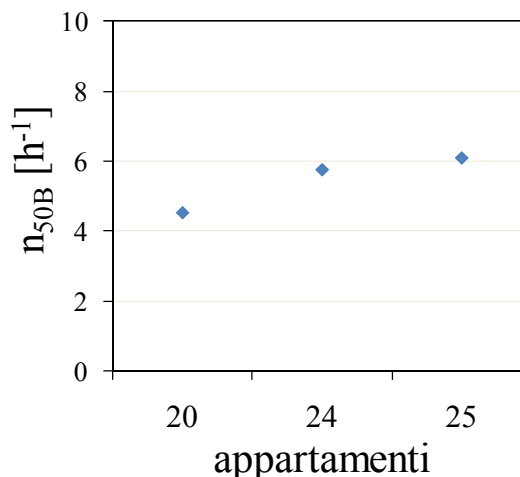


Fig. 3.5.5: confronto di n_{50} ottenuto da prove con metodo B tra gli appartamenti 20, 24 e 25.

In Fig. 3.5.5 si riporta il confronto tra valori di n_{50} ottenuti da prova con metodo B rilevati negli appartamenti 20, 24 e 25 (identici e facenti parte della stessa palazzina, ma posizionati in piani diversi). In questo caso si registra un aumento relativo rispettivamente del 28% e del 35% dell' n_{50B} per le unità 24 e 25 rispetto quello registrato per l'unità 20, dunque valgono le stesse considerazioni effettuate per le medesime unità con il metodo A in Sez. 3.5.1. Per quanto riguarda le case a schiera 1 e 2, si registra un aumento relativo dell'11% tra n_{50B} dell'unità 1 rispetto quello dell'unità 2; entrambi i valori sono comunque inferiori a $1 h^{-1}$. Poiché le prove con metodo A fornivano circa lo stesso valore di n_{50} , e l'unico foro presente per la ventilazione naturale era quello della cappa della cucina la cui apertura o chiusura era regolabile attraverso una valvola, si può notare la differenza nel contributo totale alla permeabilità dovuta probabilmente al montaggio o alla conformazione della valvola stessa.

Anche in questo caso, come per il caso di prova secondo metodo A, non sembra esserci una correlazione tra l' n_{50} e l'ELA dei casi testati ed il perimetro degli infissi, come si nota in Fig. 3.4.9; si segnala che la prova con metodo B non considera il contributo dovuto alle aperture per la ventilazione naturale essendo queste sigillate.

3.6 Analisi dei risultati ottenuti applicando i modelli di infiltrazione

In Fig. 3.6.1 si riportano, per gli appartamenti testati, i valori di n ottenuti da prove con metodo A ricavati applicando i metodi indicati in Sez. 3.2.2. In particolare per quanto riguarda il metodo discusso da Sherman, essendo i valori di N_0 riferiti agli stati del Nord America, si sono considerati gli estremi dell'intervallo riportati in (Sherman, 1987) ed il valore medio, ovvero $N_0 = 13$ (modello denominato Sherman1), $N_0 = 20$ (modello denominato Sherman2), $N_0 = 26$ (modello denominato Sherman3). I valori dei coefficienti c_{f1} e c_{f2} sono stati imposti in base alle caratteristiche dell'edificio testato, il valore di c_{f3} è stato imposto pari a 1, che corrisponde alla presenza di fessure normali all'interno dell'edificio (Tab. 3.3). E' da sottolineare, comunque, che il modello di Sherman è riferito ad abitazioni monofamiliari del Nord America, dunque un'applicazione di questi modelli alle tipologie edilizie europee potrebbe non essere adeguata.

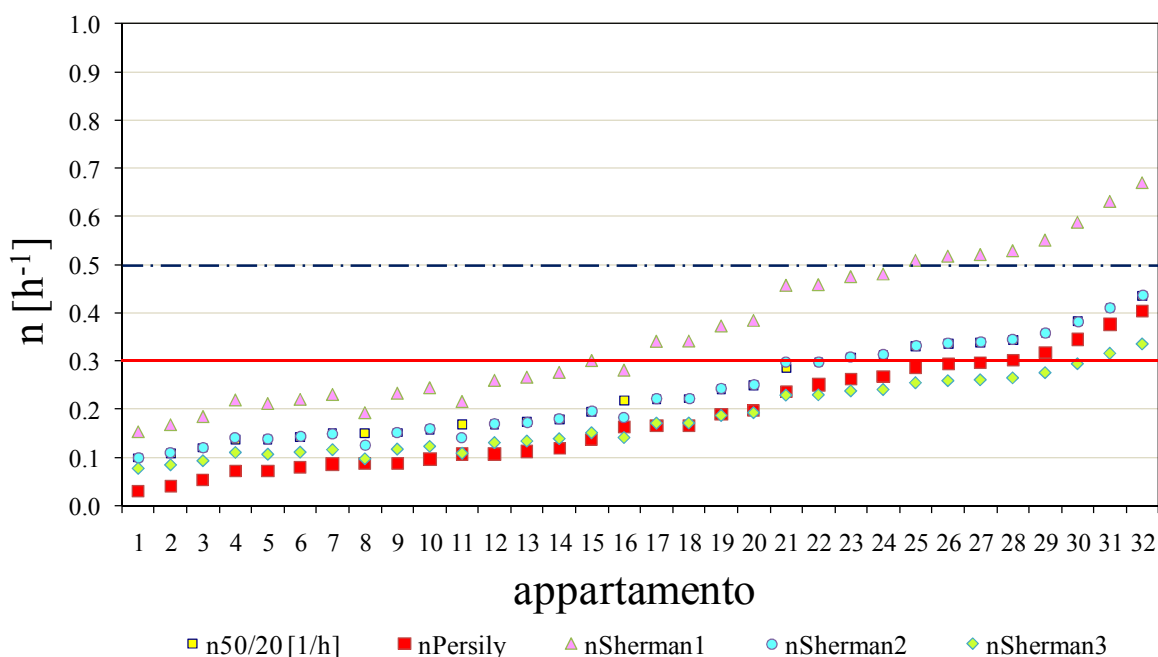


Fig. 3.6.1: applicazione dei diversi modelli di infiltrazione ai risultati delle prove di pressurizzazione con metodo A per appartamenti; - valore medio per edifici con ventilazione naturale secondo UNI/TS 11300-1:2008, - valore medio di riferimento in (Naydenov, Schiavon e Zecchin 2009).

Dall'esame di Fig. 3.6.1 si nota come, considerando i metodi del 'diviso 20' e di Sherman2, circa il 70% degli edifici testati presenta un valore di n inferiore a 0.3 h^{-1} , ovvero quello di progetto per edifici residenziali in UNI/TS 11300-1:2008, dunque non risulterebbero sufficientemente

ventilati. Secondo il modello di Persily, invece, gli appartamenti con n inferiore a 0.3 h^{-1} sarebbero circa l'88%, mentre considerando il metodo Sherman3, raggiungerebbero il 94%. Inoltre, considerando i modelli finora citati, tutte le unità avrebbero un n inferiore a 0.5 h^{-1} , che come riportato in (Naydenov, Schiavon e Zecchin 2009) è ritenuto il tasso di riferimento per la ventilazione negli ambienti residenziali, anche se è specificato nello stesso lavoro e in (Raisa, Schiavon e Zecchin 2010) che per determinare la portata d'aria di rinnovo necessaria in un edificio non si dovrebbe considerare il tasso di rinnovo dell'aria, bensì la portata d'aria per persona, il tasso di occupazione e la produzione di inquinanti. Secondo il metodo Sherman1, invece, la metà degli edifici supererebbe il valore di n pari a 0.3 h^{-1} , ed il 22% supererebbe il valore di 0.5 h^{-1} .

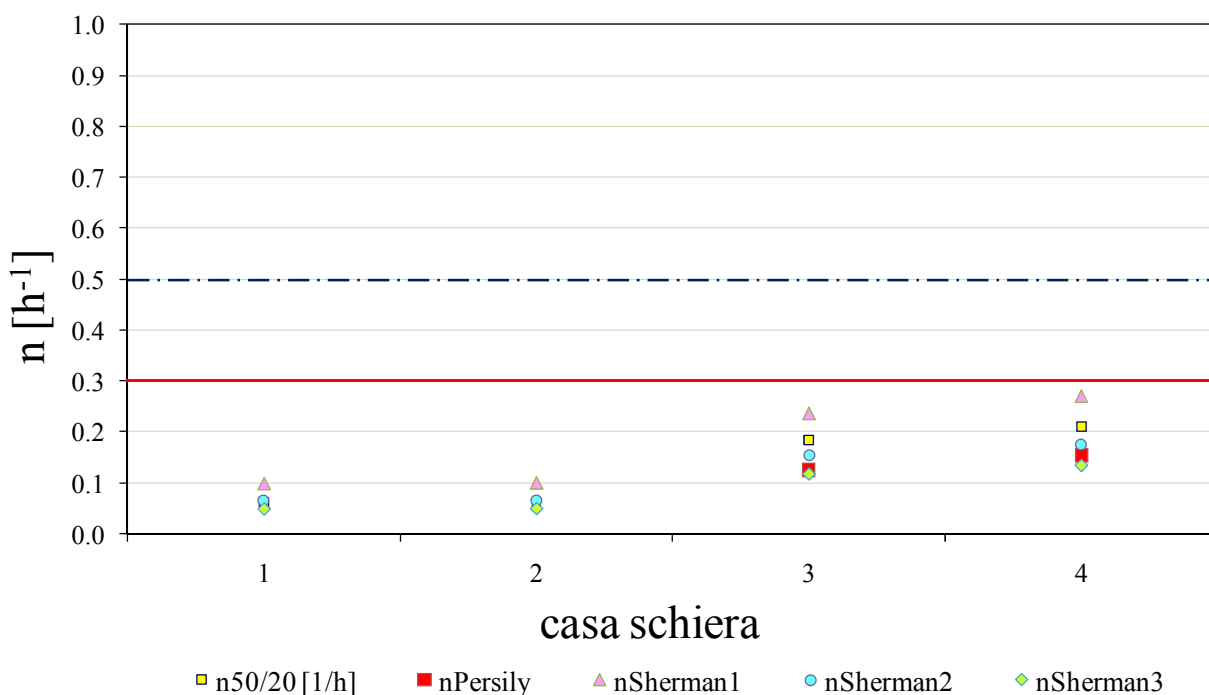


Fig. 3.6.2: applicazione dei diversi modelli di infiltrazione ai risultati delle prove di pressurizzazione con metodo A per case a schiera; - valore medio per edifici con ventilazione naturale secondo UNI 11300-1:2008, - valore di riferimento in (Naydenov, Schiavon e Zecchin 2009).

In Fig. 3.6.2 si riportano i risultati dell'applicazione dei vari metodi di infiltrazione alle case a schiera testate; il modello di Persily per le unità 1 e 2 presenta valori negativi. In questo caso, per tutte le unità il valore di n è inferiore a 0.3 h^{-1} , ed in particolare per le unità 1 e 2 esso è addirittura inferiore a 0.1 h^{-1} .

	$n_{50}/20$ [h ⁻¹]	n Persily [h ⁻¹]	n Sherman1 [h ⁻¹]	n Sherman2 [h ⁻¹]	n Sherman3 [h ⁻¹]
Casa singola S1	0.09	0.01	0.14	0.09	0.07

Tab. 3.7: applicazione dei diversi modelli di infiltrazione ai risultati delle prove di pressurizzazione con metodo A per casa singola.

Infine in Tab. 3.7 sono riassunti i risultati per il caso di casa singola considerato nella campagna di misure. L'unità in questione è stata interessata da un intervento di riqualificazione energetica; il valore risultante dall'analisi con i vari metodi è piuttosto basso (inferiore a 0.1 h⁻¹ eccetto il caso di metodo Sherman1), dunque l'n risulta molto inferiore rispetto al valore di progetto di 0.3 h⁻¹ espresso in (UNI/TS 11300-1:2008).

Nel paragrafo seguente si riporta uno studio mirato alla valutazione del modello più adeguato per i casi testati.

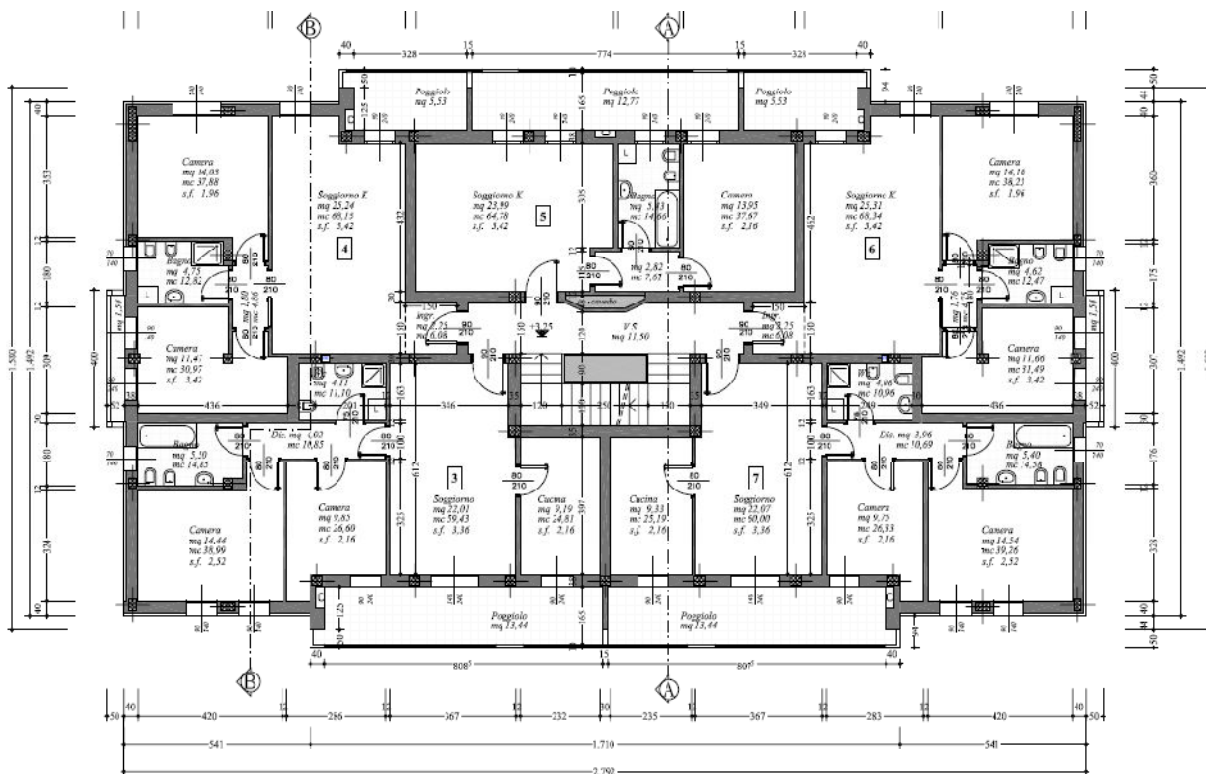
3.7 Analisi numerica e confronto con valori sperimentali

Per alcuni dei casi precedentemente discussi, facenti parte delle unità testate nella campagna di misure di pressurizzazione, è stato impostato il seguente studio. Come ampiamente discusso, il metodo di Blower Door fornisce come risultato la portata d'aria uscente o entrante in un edificio ad una certa differenza di pressione di riferimento normalizzata secondo i criteri esposti in Sez. 3.2. Per ottenere l'indice di ricambi orari n , si è provveduto a simulare il comportamento all'infiltrazione d'aria di appartamenti facenti parte di una palazzina di tre piani sita in Vigonza (PD) (Fig. 3.7.1) mediante il software di analisi di portate d'aria e trasporto di contaminanti per ambienti multizone CONTAM (Walton e Stuart Dols 2010). Questo modello permette di ricavare l'indice n dell'unità considerata una volta definite le caratteristiche geometriche e strutturali dell'edificio stesso (in particolare l'area corrispondente alle fessure), e le condizioni di set point interne e climatiche esterne. Mediante il software è stata modellata l'intera palazzina; il confronto tra valori simulati e misurati è stato poi disposto per gli appartamenti 4, 8, 11, 16 e 21 per i quali si sono eseguite le prove di pressurizzazione. Il problema della ripartizione dell'ELA risultante da prova su singoli componenti di involucro, quali serramenti, porte etc., distinguendo tra case singole ed appartamenti, è stato affrontato in letteratura in numerosi lavori, tra i quali sono stati precedentemente menzionati (Tamura 1975), (Dickerhoff, Grimsrud e Lipschutz 1982), (Kalamees, et al. 2008), (Levin 1988), (Haghighat, 2003), (Haghighat e Megri, 1996). Ai fini di questo lavoro, e seguendo quanto riportato negli articoli suindicati, si è ripartito il 25% dell'ELA lungo le giunzioni perimetrali tra parete e parete e tra parete e solaio/tetto, ed il restante 75% lungo il perimetro dei serramenti. Una volta impostato il modello geometrico in CONTAM, si sono applicate le condizioni al contorno del TRY (Mazzarella 1997) della località climatica più vicina disponibile (Venezia) ed una temperatura interna di set point pari a 21°C. In tal modo, si sono ottenuti, come output del modello di calcolo, i valori orari di n per ciascuna unità abitativa: tali valori sono riportati nei grafici di Fig. 3.7.2, mentre in Tab. 3.8 sono riportati i valori medi annuale, sulla stagione di raffrescamento e sulla stagione di riscaldamento. In Tab. 3.9 e Fig. 3.7.3 è riportato il confronto tra i valori ottenuti dall'applicazione dei modelli di infiltrazione citati in 3.2.2 ed i valori medi di n annuale e sulla stagione di riscaldamento ottenuti da simulazione. Per chiarezza d'esposizione si sono indicati gli appartamenti nelle simulazioni come contrassegnati dalla lettera V ed ordinati da 1 a 10 (Tab. 3.8); per quanto riguarda

l'identificazione degli edifici per i quali si dispone della misura, a V1 corrisponde A16, a V3 A11, a V4 A8, a V8 A4, a V9 A21 (Tab. 3.9).



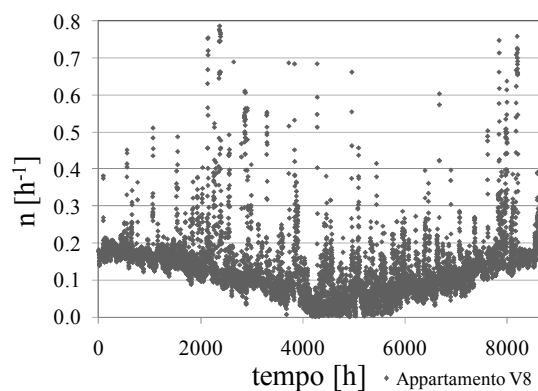
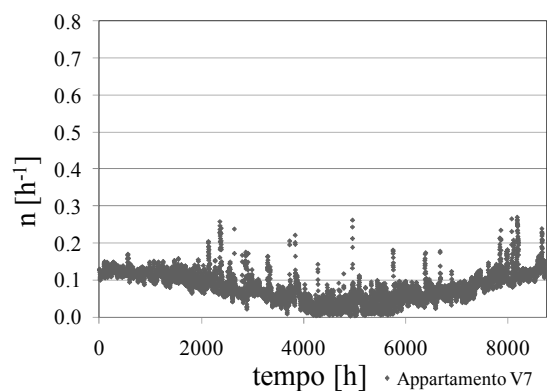
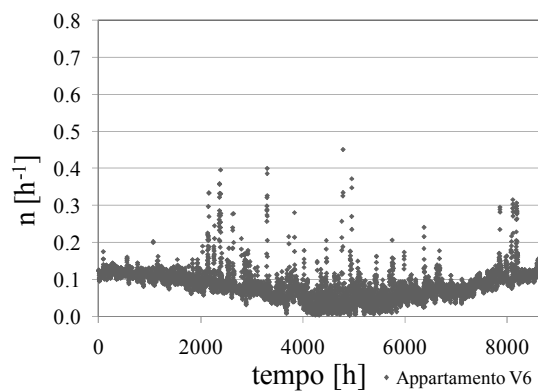
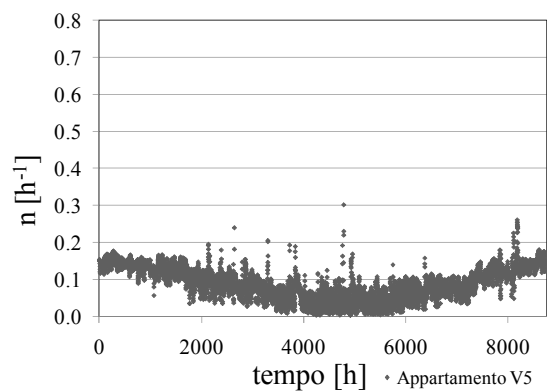
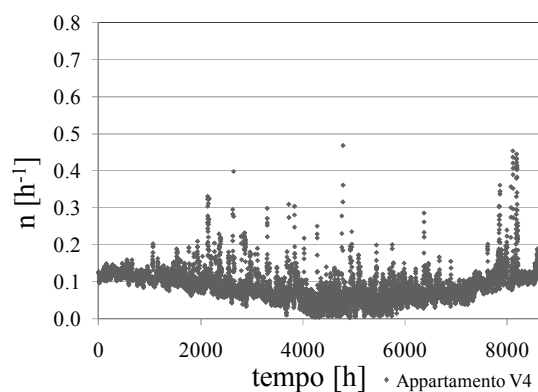
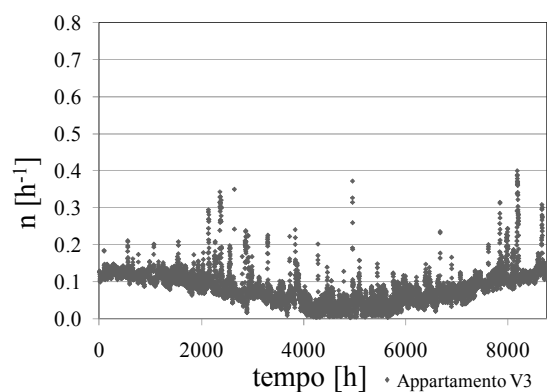
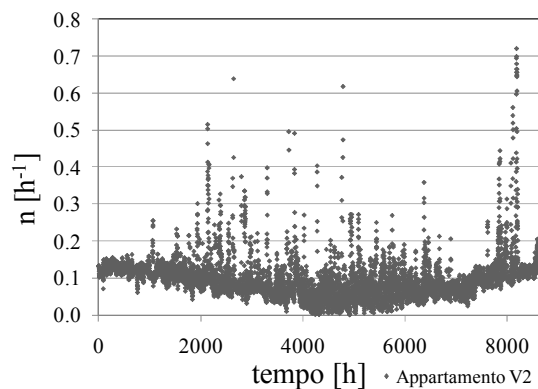
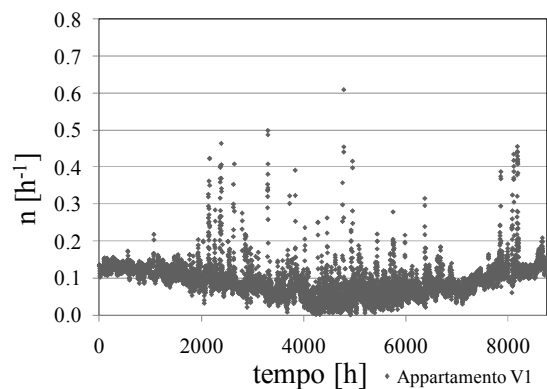
(A)



PIANO PRIMO

(B)

Fig. 3.7.1: (A) fotografia della palazzina sita in Vigonza (PD), (B) pianta del piano primo.



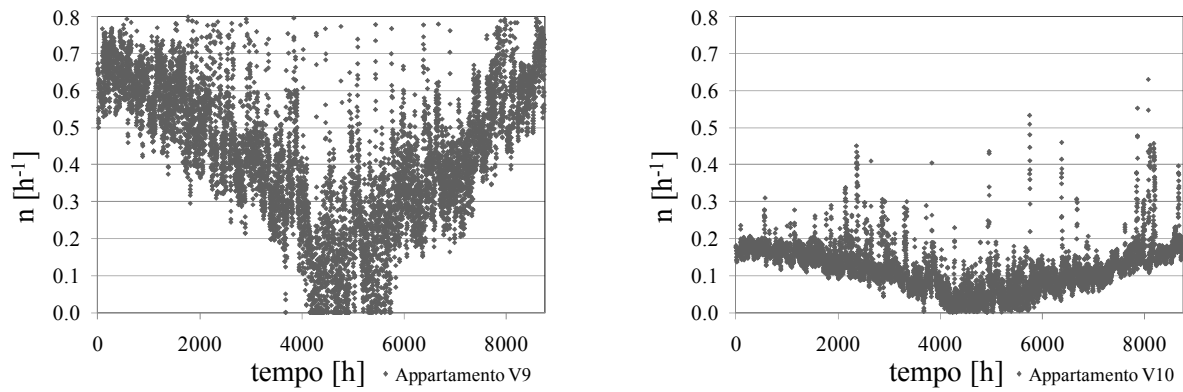


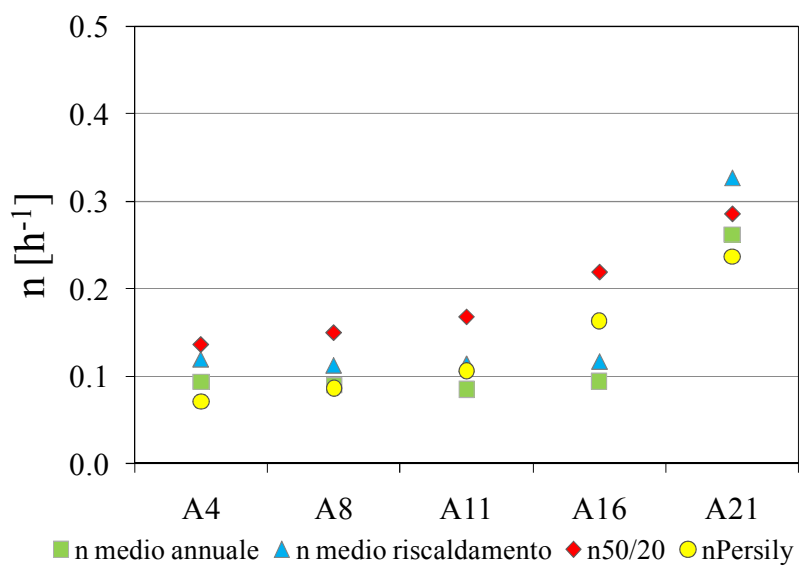
Fig. 3.7.2: risultati delle simulazioni con modello di calcolo CONTAM, n orario per gli appartamenti di Vigonza (PD) - simulazioni su base annua.

	V1 (A16)	V2	V3 (A11)	V4 (A8)	V5	V6	V7	V8 (A4)	V9 (A21)	V10
n medio annuale [h ⁻¹]	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.26	0.08
n medio stagione riscaldamento [h ⁻¹]	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12	0.10	0.11	0.12	0.33	0.10
n medio stagione raffrescamento [h ⁻¹]	0.07	0.07	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.08	0.27	0.07

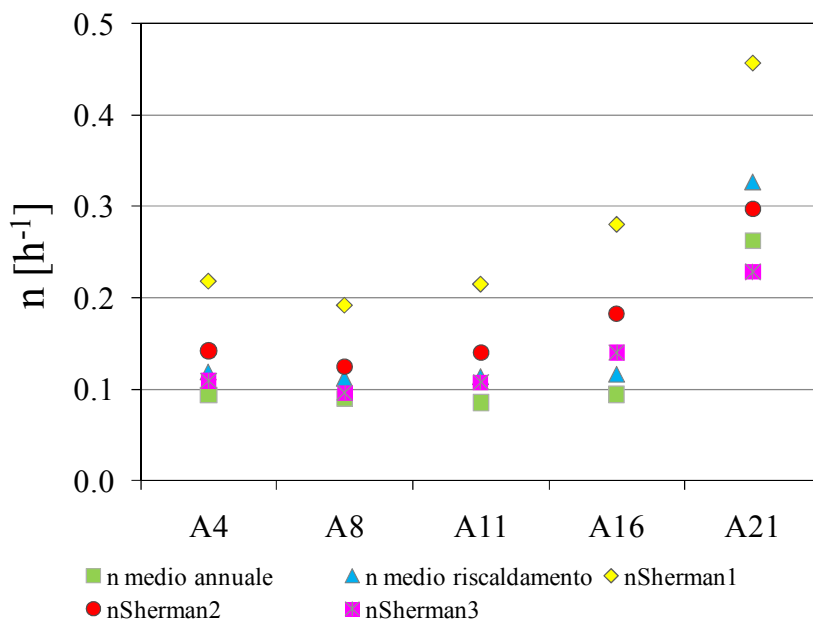
Tab. 3.8: risultati delle simulazioni con modello di calcolo CONTAM per gli appartamenti di Vigonza (PD) – valori medi annuale, sulla stagione di riscaldamento e di raffrescamento.

	A4 (V8)	A8 (V4)	A11 (V3)	A16 (V1)	A21 (V9)
n ₅₀ misurato [h ⁻¹]	2.73	3.00	3.36	4.38	5.70
n _{50/20} [h ⁻¹]	0.14	0.15	0.17	0.22	0.29
nPersily [h ⁻¹]	0.07	0.09	0.11	0.16	0.24
nSherman1 [h ⁻¹]	0.22	0.19	0.22	0.28	0.46
nSherman2 [h ⁻¹]	0.14	0.13	0.14	0.18	0.30
nSherman3 [h ⁻¹]	0.11	0.10	0.11	0.14	0.23
n medio annuale [h ⁻¹]	0.09	0.09	0.09	0.09	0.26
n medio stagione riscaldamento [h ⁻¹]	0.12	0.11	0.11	0.12	0.33
Δ ₁	45%	67%	97%	132%	9%
Δ ₂	15%	34%	47%	88%	-13%
Δ ₃	-24%	-4%	25%	73%	-10%
Δ ₄	-40%	-23%	-6%	40%	-27%
Δ ₅	133%	114%	153%	197%	74%
Δ ₆	84%	71%	89%	141%	40%
Δ ₇	51%	39%	64%	93%	13%
Δ ₈	19%	11%	23%	56%	-9%
Δ ₉	16%	7%	26%	49%	-13%
Δ ₁₀	-8%	-14%	-5%	20%	-30%
Legenda					
Δ ₁ =(n _{50/20} -n medio annuale)/(n medio annuale)			Δ ₂ =(n _{50/20} -n medio stagione di riscaldamento)/(n medio stagione di risc.)		
Δ ₃ =(nPersily-n medio annuale)/(n medio annuale)			Δ ₄ =(nPersily-n medio stagione di riscaldamento)/(n medio stagione di risc.)		
Δ ₅ =(nSherman1-n medio annuale)/(n medio annuale)			Δ ₆ =(nSherman1-n medio stagione di riscaldamento)/(n medio stagione di risc.)		
Δ ₇ =(nSherman2-n medio annuale)/(n medio annuale)			Δ ₈ =(nSherman2-n medio stagione di riscaldamento)/(n medio stagione di risc.)		
Δ ₉ =(nSherman3-n medio annuale)/(n medio annuale)			Δ ₁₀ =(nSherman3-n medio stagione di riscaldamento)/(n medio stagione di risc.)		

Tab. 3.9: risultati del confronto tra dati derivati da modello e simulati attraverso modello CONTAM.



(A)



(B)

Fig. 3.7.3: (A) confronto tra risultati ottenuti dai modelli $n_{50/20}$ e Persily, e risultati delle simulazioni, (B) confronto tra risultati ottenuti dai modelli Sherman1, Sherman2, Sherman 3 e risultati delle simulazioni.

3.8 Discussione dei risultati ottenuti da analisi numerica

Lo studio descritto in Sez. 3.7 focalizza l'attenzione sulla valutazione dell'indice di ricambi orari n a partire dal dato rilevato di n_{50} , la cui misura è sicuramente più facile e immediata rispetto a quella di n . I modelli di infiltrazione considerati sono stati descritti in Sez. 3.2.2. L'analisi è stata eseguita per alcuni appartamenti di cui si disponeva di misure in opera di n_{50} ; per tali unità si è confrontato il risultato di n ottenuto mediante l'applicazione dei vari modelli al dato di n_{50} misurato, con l' n risultante dalle simulazioni attraverso il modello CONTAM degli edifici stessi, ricavato impostando per ciascuno di questi un'area di infiltrazione pari all'ELA misurata. L'analisi evidenzia come i valori predetti siano inferiori al valore di progetto di n espresso in UNI/TS 11300-1, salvo per il caso dell'appartamento 21. Per quest'ultimo, tuttavia, si segnala un valore dell'indice n_{50} piuttosto elevato (pari quasi a 6 h^{-1}): esso è situato su due piani, ed il tetto probabilmente peggiora il comportamento all'infiltrazione, tuttavia anche l'appartamento 4 si estende su due piani ed ha il tetto, ma ha un valore di n_{50} decisamente inferiore (pari quasi a 3 h^{-1}). Per quanto riguarda la valutazione di n a partire dal dato misurato di n_{50} , i modelli considerati in 3.2.2, sono su base annua secondo (Sherman, 1987), mentre il metodo del 'diviso 20' secondo (Sherman, 1995) si riferisce a un calcolo sulla stagione di riscaldamento. In quest'analisi, il confronto è fatto sia su base annua che stagionale. Dall'esame di Tab. 3.9 e Fig. 3.7.3, sembra che la miglior approssimazione dei risultati simulati sia raggiunta attraverso il metodo Sherman3 valutato sulla stagione di riscaldamento; i casi discussi evidenziano in realtà una sottostima del valore di n che raggiunge il picco negativo del -30% in riferimento al valore simulato stagionale. Soltanto per l'unità 16 tale metodo porterebbe a una sovrastima (pari al 20% con riferimento al valore simulato stagionale). Lo stesso metodo porterebbe a una sovrastima (eccetto che per il caso 21, per il quale si registra una diminuzione relativa del -13%) di n su base annua, con il picco di variazione relativa di circa il 50% per il caso 16. Il metodo di Persily per la stima di n su base annua presenta un picco di aumento relativo pari al 73% rispetto al valore simulato per l'unità 16, mentre sottostima l' n per le unità 4, 8, 21 con diminuzione relativa massima pari al -24%. Per un confronto più dettagliato dei vari metodi si rimanda a Tab. 3.9. Tuttavia, come già discusso in precedenza, è da sottolineare che le tipologie edilizie per cui si ritengono validi i modelli di infiltrazione considerati sono tipiche del Nord America, dunque potrebbero non essere rappresentative per i casi europei. Ulteriori sviluppi di questo studio potrebbero comprendere misure con i metodi dei gas traccianti da cui

ricavare il dato di n da confrontare con i valori dei vari modelli per la validazione; inoltre, altri modelli per ricavare n da n_{50} potrebbero essere presi in considerazione. Nel bilancio energetico di un ambiente il contributo legato alla ventilazione è una voce considerevole; ad oggi la tecnica di misura mediante gas tracciante è ancora poco diffusa nel nostro Paese, dunque questo lavoro ha analizzato l'interessante opportunità di valutare il tasso di ricambio orario n attraverso misure in opera di n_{50} anche per abitazioni italiane, che costituirebbe un miglioramento significativo della realizzazione di edifici ad alta prestazione energetica e che assicuri allo stesso tempo livelli di comfort e qualità dell'aria adeguati.

3.9 Conclusioni

In questo capitolo sono stati discussi i principali elementi riguardanti la trattazione delle prove di pressurizzazione degli edifici. Nell'analisi teorica sono stati descritti i metodi attraverso cui svolgere le prove ed i risultati da queste ottenibili, con particolare attenzione alla definizione dei principali modelli di correlazione esistenti in letteratura tra permeabilità ed infiltrazione per un edificio. Successivamente sono stati discussi i risultati di una campagna di prove di pressurizzazione di edifici in Veneto; sono stati misurati complessivamente 32 appartamenti, 4 case a schiera ed una casa singola. E' emerso che circa il 60% degli appartamenti testati hanno un livello medio di impermeabilità, il 3% sono altamente impermeabili e la restante percentuale è composta da unità a bassa impermeabilità, secondo quanto riportato nella EN ISO 13789:2007. Due delle quattro case a schiera sono risultate ad elevata impermeabilità e le restanti a media tenuta, e la casa singola, che è stata interessata da un intervento di riqualificazione, è risultata ad alta tenuta.

Per quanto riguarda l'indagine di una correlazione tra n_{50} ed ELA e perimetro degli infissi, non si nota un legame tra le due grandezze, né per le prove con metodo A, né per quelle con metodo B (mediante il quale non si considerano le aperture per la ventilazione naturale); pertanto non sembra possibile mettere in relazione la permeabilità all'aria di un involucro con il solo contributo che sarebbe dovuto ai serramenti. La permeabilità all'aria è una proprietà dell'edificio legata ad una complessità di fattori, tra cui sembrano rilevanti, oltre all'apporto dovuto ai serramenti, la presenza del tetto e la posa in opera dei materiali eseguita a regola d'arte. A quest'ultimo proposito sembra possibile affermare che la permeabilità all'aria di un involucro sia una proprietà caratteristica dello stesso, ed edifici che in sede di progetto presentano le stesse caratteristiche in opera non sempre garantiscono lo stesso risultato, come evidenziano i casi degli appartamenti 27 e 31, e 20, 24 e 25 (metodi A e B), e le case a schiera 3 e 4 (metodo A). Tuttavia, il caso delle case a schiera 1 e 2 (metodi A e B) mette in risalto come, se le maestranze sono particolarmente abili, e se l'esecuzione è disposta a regola d'arte, sia possibile garantire le stesse proprietà di permeabilità per unità identiche.

Per quanto riguarda l'influenza dei fori per la ventilazione naturale, l'analisi in Fig. 3.5.4 ha evidenziato come questa sia più rilevante per le unità maggiormente impermeabili, con aumento medio relativo dell' n_{50} riscontrato dalla prova con metodo A rispetto quella con metodo B di

circa il 70% per le unità con valori di n_{50} ottenuti da prova con metodo A inferiori a 3 h^{-1} , e si riduce fino al 10% circa per gli edifici con valori di n_{50A} compresi tra 4 h^{-1} e 7 h^{-1} .

Applicando i metodi di infiltrazione è risultato che, per la maggioranza degli appartamenti considerati (con valori percentuali che variano a seconda del modello considerato), l'indice n è inferiore a 0.3 h^{-1} , valore considerato in sede di progetto in UNI/TS 11300-1:2008, eccezion fatta per le analisi con il metodo Sherman1, per il quale il 50% degli appartamenti testati presenta un valore inferiore e la restante metà un valore superiore di quello suindicato. Tutti gli appartamenti, comunque, presenterebbero un indice n minore di 0.5 h^{-1} considerato da (Naydenov, Schiavon e Zecchin 2009) come riferimento per la ventilazione degli ambienti residenziali, anche in questo caso con l'eccezione dell'applicazione del metodo di Sherman1. Per quanto riguarda le case a schiera, risulta per tutti i casi analizzati un indice n inferiore al valore espresso in UNI/TS 11300-1:2008; il metodo di Persily non sembra essere adeguato poiché per le unità 1 e 2 questo presenterebbe valori di n negativi. Anche il caso di casa singola è caratterizzato da valori di n inferiori a quanto considerato in UNI/TS 11300-1:2008. Dunque si segnala che, laddove non presente un sistema di ventilazione meccanica controllata, la maggioranza degli edifici risulterebbe non adeguatamente ventilata, mentre per il caso in cui è presente il sistema di ventilazione meccanica, solo per le case a schiera 1 e 2 è garantito il funzionamento ottimale dell'impianto, mentre si segnala un'entità rilevante del contributo legato alla ventilazione naturale per gli appartamenti 1, 6 e 17.

Infine, per quanto riguarda la modellizzazione numerica di unità di cui erano noti i valori di n_{50} ed ELA misurati, e per i quali si è ripartita l'ELA misurata all'interno dell'unità stessa, l'analisi ha evidenziato come il modello di infiltrazione che sembra garantire i risultati migliori sia quello denominato Sherman3, con una sottostima per il caso della stagione invernale e una sovrastima per quello annuale (si confronti Tab. 3.9 per un esame dei valori numerici). Tuttavia anche il modello di Persily su base annua sembra offrire una stima adeguata. Si segnala l'utilità dell'analisi svolta poiché, a partire da una prova di pressurizzazione sull'edificio, sarebbe possibile ricavare il valore dell'indice di ricambio orario n realmente riscontrato in opera.

Come evidenziato nel capitolo precedente, la misura di permeabilità all'aria, affiancata a quella di conduttanza in opera, potrebbe concorrere alla definizione del fabbisogno reale di energia per la climatizzazione e mettere in evidenza l'effettiva realizzazione dell'involucro a regola d'arte.

3.10 Bibliografia

ASHRAE. Handbook of Fundamentals. 2009.

ASHRAE Fundamental Handbook - Ventilation and Infiltration, Chapter 27, 2005.

Dickerhoff, D J, D T Grimsrud, e R D Lipschutz. «Component leakage testing in residential buildings.» LBNL, 1982 Summer Study in Energy Efficient Buildings, August 22-28, 1982. Santa Cruz CA.

EN 13829:2002. «Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method.»

EN ISO 13789:2007. «Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients -- Calculation method.»

Energy Conservatory 1. Minneapolis Blower Door, Operation Manual for Model 3 and Model 4 Systems. The Energy Conservatory, Diagnostic tools to measure building performance, 2006.

Energy Conservatory 2. Operating Instructions for the DG-700(E) Pressure and Flow Gauge, The Energy Conservatory, Diagnostic tools to measure building performance, 2006.

ENERGY PLUS. «ENERGY PLUS Energy Simulation Software, U.S. Department of Energy.» 2010.

Haghighat, F. «Development of a procedure to evaluate the air leakage distribution from fan pressurization test – Validation of three airflow models.» Digital Library of Construction Informatics, 2003: paper w78-2003-137.

Haghighat, F, e A C Megri. «A comprehensive validation of Two Airflow Models – COMIS and CONTAM.» Indoor Air, 1996: 6, pp. 278-288.

ISO GUIDE. «ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement.» 1995.

Kalamees, T, M Korpi, L Eskola, J Kurnitski, E J Vinha. «The distribution of the air leakage places and thermal bridges in Finnish detached houses and apartment buildings.» Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. Copenhagen, Denmark, 2008.

Karagiozis, A. «Impact of Air Leakage on the Thermal and Moisture Performance of the Building Envelope?» Proceedings of the Air Barriers III Conference: Air Barrier Solutions for Buildings in North American Climates. Washington DC, US, 2001.

Levin, P. «Air leakage between apartments.» 9th AIVC Conference. Gent, Belgium 12-15 September, 1988.

- Mazzarella, L. «Dati Climatici "G. De Giorgio".» Atti Giornata di studio a memoria "Giovanni de Giorgio" Politecnico di Milano, Dip. Energetica. Milano, 18 Novembre 1997, 1997.
- Montoya, M I, E Pastor, F R Carrié, G Guyot, e E Planas. «Air leakage in Catalan dwellings: Developing an airtightness model and leakage airflow predictions.» *Building and Environment*, 2010: 45 (2010), pp. 1458-1469.
- Naydenov, K, S Schiavon, e R Zecchin. «Quanto ventilare gli edifici residenziali?» CDA n.6 Giugno 2009 (CDA n. 6 Giugno 2009), 2009.
- Raisa, V, S Schiavon, e R Zecchin. *Teoria e tecnica della ventilazione, soluzioni per l'edilizia residenziale e per il piccolo terziario*. Milano: Editoriale Delfino, 2010.
- Sherman, M H. «Estimation of Infiltration from Leakage and Climate Indicators.» *Energy and Buildings*, 1987: 10: 81-86.
- Sherman, M H. *Infiltration Degree-Days: A Statistic for Infiltration-Related Climate*. Lawrence Berkeley Laboratory Report, LBL-19237, April 1986, ASHRAE Trans. 92(II), 1986.
- Sherman, M H. «The use of blower-door data.» *Indoor Air*, 1995: Vol. 5, 215-224.
- Sherman, M H, e D J Dickerhoff. «Air Tightness of U.S. Dwellings.» *Proceedings, 15th AIVC Conference, The Role of Ventilation, Volume 1*. Buxton, U.K., 1994.
- Sherman, M H, e L Palmiter. *Uncertainties in fan pressurization measurements' Special Technical Publication of ASTM, Air Flow Performance of Building Envelopes, Components and Systems*. LBL-32115, LBL, 1994.
- Tamura, G T. «Measurement of air leakage characteristics of house enclosures.» *ASHRAE Transactions Vol. 81, Part 1*, pp. 202-211, 1975.
- UNI/TS 11300-1:2008. «Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.» 2008.
- Walton, G N, e W Stuart Dols. *CONTAM, User Guide and Program Documentation*. NIST National Institute of Standards and Technology, Technology Administration, U.S, Department of Commerce, 2010.

4 Capitolo 4. Analisi energetiche nel settore civile

Riassunto

In questo capitolo si discute uno studio comparativo tra fabbisogni energetici lato edificio, sia per la climatizzazione estiva che per quella invernale, di edifici residenziali e del settore terziario situati nei tre climi italiani di Milano, Roma e Palermo; in tal modo si sono analizzate condizioni climatiche molto differenti attraverso simulazioni dinamiche. Per ciascuna tipologia edilizia si è considerato un edificio tipo, con caratteristiche di isolamento termico degli elementi d'involucro adeguate rispetto alla zona climatica in cui l'edificio stesso è situato. L'analisi è stata eseguita attraverso simulazioni orarie, e sono stati presi in considerazione i principali elementi che concorrono alla definizione del fabbisogno energetico netto dell'edificio. In particolare, si sono variate le caratteristiche legate alla gestione degli impianti di climatizzazione per quanto riguarda la ventilazione ed il mantenimento di determinate condizioni di set-point, e diverse modalità di definizione degli apporti gratuiti sono state imposte. Si è distinto, per quanto riguarda la climatizzazione invernale, tra fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento laddove necessario, e per quella estiva tra fabbisogno di calore sensibile e latente.

Nomenclatura

Q_{Risc}	fabbisogno specifico di energia netto dell'edificio per riscaldamento [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$]
Q_{Raffr}	fabbisogno specifico di energia netto dell'edificio per raffrescamento [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$]
Q_{Sens}	fabbisogno specifico di energia netto dell'edificio per raffrescamento – quota parte di calore sensibile [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$]
Q_{Lat}	fabbisogno specifico di energia netto dell'edificio per raffrescamento – quota parte di calore latente [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$]
$Q_{\text{h,W}}$	fabbisogno specifico di energia termica utile per acqua calda sanitaria [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$]
$W_{\text{illuminazione}}$	fabbisogno specifico di energia elettrica per illuminazione [$\text{kWh}_e\cdot\text{m}^{-2}$]
$W_{\text{apparecchiature}}$	fabbisogno specifico di energia elettrica per apparecchiature [$\text{kWh}_e\cdot\text{m}^{-2}$]
MAD	tipologia di utente oculato – simulazioni di edificio nel settore terziario
PM	tipologia di utente non oculato – simulazioni di edificio nel settore terziario
n	indice di ricambi orari [h^{-1}]
ρ	massa volumica [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
c	calore specifico [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
λ	conducibilità termica [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

4.1 L'approccio analitico alle simulazioni

Come già esposto nel Capitolo 1, a livello globale il consumo di energia per i settori residenziale e terziario ha una forte rilevanza. In particolare in Italia l'aumento dei consumi energetici negli ultimi anni ha riguardato soprattutto il settore residenziale e terziario, sia per quanto riguarda i consumi di gas per il riscaldamento, che per quanto concerne i consumi elettrici per la climatizzazione estiva. Pertanto, è opportuno prevedere strategie per ridurre tali consumi.

Nel presente lavoro si è mirato ad uno studio comparativo tra fabbisogni energetici netti, lato edificio, sia per la climatizzazione estiva che per quella invernale di edifici tipo del settore residenziale e terziario situati in tre climi italiani differenti; per ciascun caso si è considerato un edificio con caratteristiche di isolamento termico degli elementi d'involucro adeguate allo standard normativo italiano DLgs 192/05, DLgs 311/06, DPR 59/09, e DPR 412/93 a seconda della zona climatica. L'analisi è stata eseguita con il codice di calcolo dinamico TRNSYS 15 (TRNSYS 2000), attraverso simulazioni orarie: in tal modo sono stati presi in considerazione i principali elementi che concorrono alla definizione del fabbisogno energetico netto dell'edificio. In particolare, si sono variate le caratteristiche legate alla gestione degli impianti di climatizzazione:

- per quanto riguarda la ventilazione sono stati utilizzati indici di ricambi orari differenti (costanti e variabili, secondo profili diversi); inoltre è stata considerata l'eventuale presenza del recuperatore di calore;
- per quanto concerne il raggiungimento e mantenimento di temperature di set-point all'interno degli ambienti attraverso i terminali d'impianto, sono stati imposti due diversi profili di temperatura (set-point fisso e set-point variabile).

Gli apporti dovuti alla presenza di carichi interni (ovvero occupanti apparecchiature ed illuminazione) sono stati assunti secondo quanto previsto da normativa italiana (UNI/TS 11300-1:2008) ed adattando lo studio alle differenti utenze.

Gli edifici sono stati collocati all'interno di tre climi italiani differenti, Milano, Roma e Palermo, attraverso l'implementazione dei file climatici del codice Energy Plus (ENERGY PLUS 2010), con la stessa orientazione, ma si sono variate le caratteristiche di isolamento dell'edificio stesso in conformità a quanto previsto dal quadro legislativo italiano. Ciò ha reso

possibile il confronto tra condizioni al contorno, specialmente per quanto riguarda la radiazione solare, molto differenti e gradualmente meno e più gravose rispettivamente per la climatizzazione invernale e per quella estiva.

Per ciascun caso si sono ricavati i fabbisogni netti dell'edificio, distinguendo per la climatizzazione invernale, tra fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento laddove necessario, e per quella estiva tra fabbisogno di calore sensibile e latente.

Il software utilizzato per questo studio è TRNSYS (TRNSYS 2000) che permette la simulazione dinamica di vari sistemi, tra cui edifici multizona. La modellizzazione dell'involucro edilizio è stata realizzata a partire dalla definizione delle superfici associate all'edificio, definite in base all'orientazione spaziale rispetto agli assi cardinali e all'inclinazione rispetto ad un piano orizzontale di riferimento. Per ogni zona termica dell'edificio si sono impostati il volume, i valori iniziali di temperatura e umidità relativa e i dati necessari a valutare le variabili del sistema, quali parametri del sistema di riscaldamento, carichi interni, apporti di umidità, parametri degli impianti di ventilazione e raffrescamento. I parametri di progetto dell'impianto sono stati forniti in diversi modi; mediante un valore costante di set-point o mediante una schedule programmabile giornalmente per valori orari o settimanalmente per valori giornalieri, infine mediante file di input esterni in formato testo.

Una volta definite le zone termiche si sono caratterizzate le strutture murarie e i componenti finestrati in esse presenti, definendo le proprietà di ciascuno strato componente l'elemento di involucro. Si è proceduto, in tal modo, a costruire tutte le pareti esterne ed interne dell'edificio, i solai ed il tetto. Ogni superficie è stata poi allocata nello spazio dell'edificio, distinguendo tra parete esterna, ovvero di separazione tra la zona termica e l'ambiente esterno, adiacente, cioè di separazione tra zone termiche differenti dell'edificio stesso ed infine, 'boundary', ovvero a contatto con un ambiente le cui caratteristiche sono impostate dall'utente (come accade, ad esempio, nel caso di piano interrato, le cui pareti perimetrali confinano con il terreno a profilo di temperatura variabile). Per quanto riguarda i componenti finestrati si sono definiti la superficie dell'elemento trasparente e quella del telaio, le caratteristiche di trasmittanza termica ed il fattore solare. Completata la creazione del modello dell'involucro edilizio si sono introdotte le condizioni per avviare la simulazione, ovvero:

- condizioni iniziali di temperatura e umidità relativa della zona
- condizioni al contorno di:
 - o temperatura e umidità relativa delle zone termiche adiacenti;

- temperatura e umidità relativa dell'ambiente esterno;
- apporto di calore dovuto alla radiazione solare incidente sulle superfici esterne.
- parametri di progetto e d'impianto che influenzano le condizioni termo igrometriche della zona:
 - sistema di riscaldamento in condizioni invernali;
 - sistema di raffrescamento in condizioni estive;
 - carichi interni di calore sensibile e latente dovuti alla presenza di persone o all'utilizzo di elettrodomestici/macchinari;
 - tasso di ricambio orario n per la ventilazione.

I dati climatici sono stati reperiti tramite il software di analisi energetica EnergyPlus (ENERGY PLUS 2010): essi contengono una completa definizione delle condizioni ambientali per la località considerata. Tra i dati riportati vi sono la temperatura dell'aria a bulbo secco e a bulbo bagnato, l'umidità relativa, la radiazione solare sull'orizzontale diretta, diffusa e globale. I climi considerati sono quelli di Milano, zona climatica E (2404 GG), Roma, zona D (1415 GG), e Palermo, zona B (751 GG) rispettivamente.

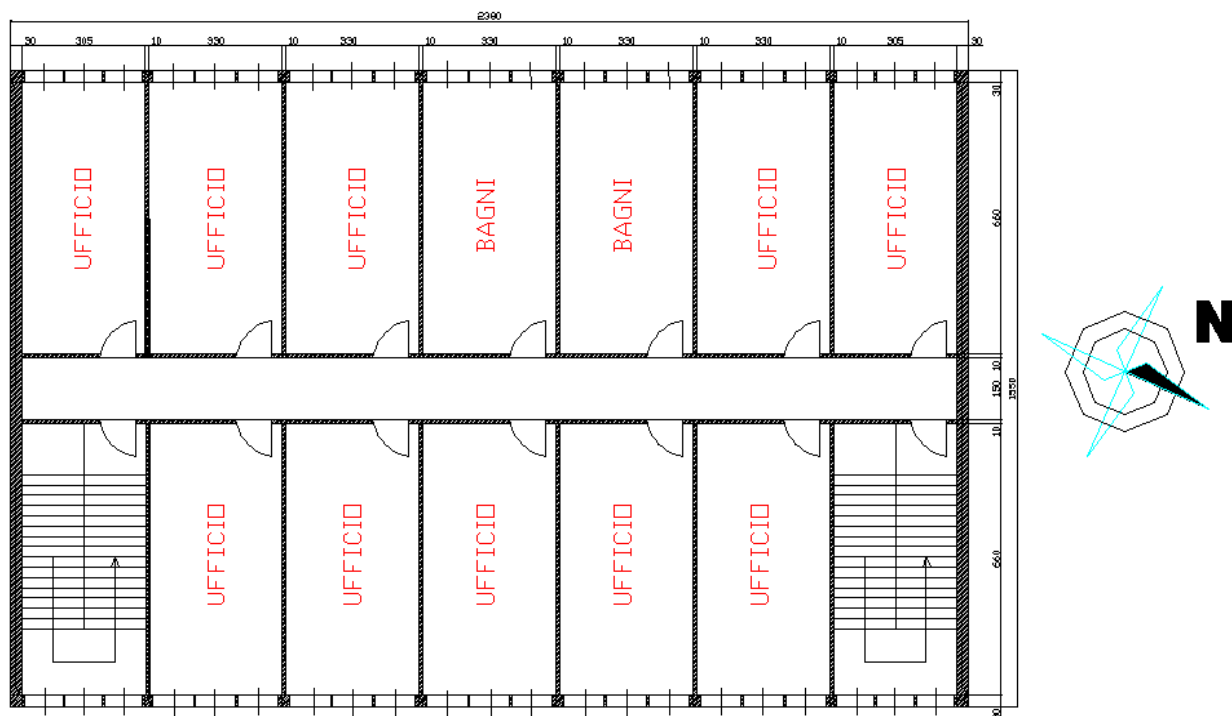
4.2 Analisi di un edificio tipo del settore terziario

4.2.1 Descrizione dell'edificio tipo

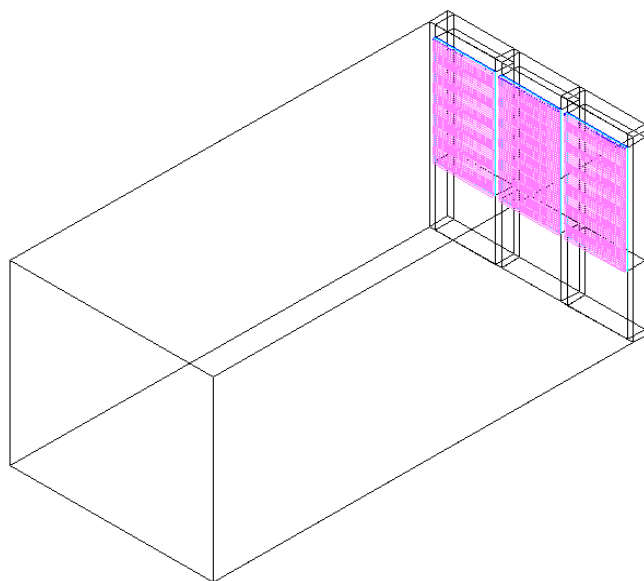
L'edificio tipo per il settore terziario considerato nell'analisi è sviluppato su tre piani e presenta per ogni piano dieci unità-ufficio, ciascuna ideata per quattro occupanti, due vani scale, due bagni e un corridoio. Tutti i vani sono riscaldati, le superfici finestrate sono equamente ripartite sui lati esposti ad Est ed Ovest. Le caratteristiche dell'edificio sono riassunte in Tab. 4.1; in Fig. 4.2.1 sono riportate le piante del piano tipo e dell'unità ufficio tipo.

Superficie Riscaldata Totale Lorda [m ²]	1107
Superficie Riscaldata Totale Netta [m ²]	941
Volume Totale Lordo [m ³]	3320
Volume Totale Netto [m ³]	2822
Superficie Uffici Totale Lorda [m ²]	714
Superficie Uffici Totale Netta [m ²]	607
Superficie Servizi/Scale Totale Lorda [m ²]	286
Superficie Servizi/Scale Totale Netta [m ²]	243
Superficie Corridoio Totale Lorda [m ²]	107
Superficie Corridoio Totale Netta [m ²]	91
Superficie Finestrata Totale [m ²]	162
Superficie del Telaio [m ²]	24

Tab. 4.1: caratteristiche dell'edificio tipo per il settore terziario simulato



(A)



(B)

Fig. 4.2.1: caratteristiche dell'edificio tipo per il settore terziario: (A) pianta del piano tipo (quote in cm), (B) modello dell'unità ufficio-tipo (non quotato).

Per le analisi sono state utilizzate strutture ad elevate prestazioni di isolamento termico, con valori di trasmittanza termica inferiori allo standard edilizio italiano imposti dai recenti decreti DLgs 192/05 2005, DLgs 311/06 2006, DPR 412/93 1993, DPR 59/09 2009. Al variare della zona climatica, dalla E alla B, si sono variate le strutture, mediante riduzione progressiva dello spessore di isolante, utilizzando anche elementi finestrati con differenti prestazioni energetiche; in tal modo si è cercato di influire nella minore misura possibile sulle caratteristiche di capacità termica dell'edificio stesso. Le strutture utilizzate per gli edifici nei vari climi sono riassunte nelle Tab. 4.2, Tab. 4.3, e Tab. 4.4.

	U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
Parete esterna	0.234
Tetto	0.230
Solaio interpiano	0.530
Solaio controterra	0.290
Parete divisoria interna	1.430
Superficie vetrata (vetro + telaio)	U = 1.700 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; g = 0.60

Tab. 4.2: strutture utilizzate per l'edificio tipo nel clima di Milano.

	U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
Parete esterna	0.250
Tetto	0.246
Solaio interpiano	0.530
Solaio controterra	0.323
Parete divisoria interna	1.430
Superficie vetrata (vetro + telaio)	U = $1.700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; g = 0.60

Tab. 4.3: strutture utilizzate per l'edificio tipo nel clima di Roma.

	U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
Parete esterna	0.340
Tetto	0.290
Solaio interpiano	0.530
Solaio controterra	0.380
Parete divisoria interna	1.430
Superficie vetrata (vetro + telaio)	U = $2.700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; g = 0.80

Tab. 4.4: strutture utilizzate per l'edificio tipo nel clima di Palermo.

4.2.2 *Descrizione del procedimento*

Sono state ricreate tre diverse situazioni di occupazione degli edifici, denominate A, B e C. Esse differiscono tra loro per i diversi profili di temperature di set-point e umidità relative (RH) imposte, per la gestione della ventilazione (con e senza recupero di calore), per i profili di carichi interni legati alla presenza di occupanti, carichi di illuminazione e apparecchiature quali PC. Per generare tali profili si è utilizzato il software DAYSIM (NRCC 2010), mediante il quale si sono ottenuti gli andamenti di presenza di occupanti e accensione delle apparecchiature all'interno dell'ambiente. In particolare si è distinto tra due differenti tipologie di occupanti: un utente più oculato, denominato MAD, il quale gestisce sia la regolazione della veneziana che i carichi di illuminazione in funzione della presenza di radiazione solare o meno, ed un utente meno attento, denominato PM, che non utilizza la veneziana (sempre lasciata a schermare la radiazione solare) e non regola i carichi di illuminazione a seconda della presenza o meno di radiazione solare incidente. Nel caso di impostazione di temperatura di set-point costante si è seguito l'approccio della UNI/TS 11300-1:2008 per valutazioni di progetto o standard. Le soluzioni implementate sono riportate in Tab. 4.5, Tab. 4.6 e Tab. 4.7.

Profilo di temperature di set-point invernali	21°C da lunedì a venerdì h. 07:00-17:00 18°C da lunedì a venerdì h. 17:00-07:00 e nel week-end
Profilo di temperature e umidità relativa di set-point estive	25°C, RH=50% da lunedì a venerdì h. 07:00-17:00 30°C, RH=80% da lunedì a venerdì h. 17:00-07:00 e week end
Carichi interni	30 unità uffici da 4 occupanti ciascuno, equivalenti alla presenza di 120 persone di picco. Il profilo di occupazione è generato dal software DAYSIM, ad ogni persona corrispondono 75 W di carico sensibile e 75 W di carico latente (secondo ISO 7730, 'light work'); a ciascuna persona è associato un PC corrispondente ad un carico di 140 W. Il carico di illuminazione è generato dal software DAYSIM e prevede un carico massimo di 15 W/m ² in riferimento alla superficie netta. I carichi sono differenziati tra configurazione utente MAD e PM.
Ventilazione	40 m ³ /h di aria di rinnovo per persona, cui corrisponde un picco di tasso di rinnovo pari a 1.45 h ⁻¹ , da lunedì a venerdì h. 07:00-17:00; Impianto non attivo da lunedì a venerdì h. 17:00-07:00 e nel week-end

Tab. 4.5: condizioni di temperatura, umidità relativa, carichi interni e ventilazione per il caso A.

Profilo di temperature di set-point invernali	21°C da lunedì a venerdì h. 07:00-17:00 18°C da lunedì a venerdì h. 17:00-07:00 e nel week-end
Profilo di temperature e umidità relativa di set-point estive	25°C, RH=50% da lunedì a venerdì h. 07:00-17:00 30°C, RH=80% da lunedì a venerdì h. 17:00-07:00 e week-end
Carichi interni	30 unità uffici da 4 occupanti ciascuno, equivalenti alla presenza di 120 persone di picco. Il profilo di occupazione è generato dal software DAYSIM, ad ogni persona corrispondono 75 W di carico sensibile e 75 W di carico latente (secondo ISO 7730, 'light work'); a ciascuna persona è associato un PC corrispondente ad un carico di 140 W. Il carico di illuminazione è generato dal software DAYSIM e prevede un carico massimo di 15 W/m ² in riferimento alla superficie netta. I carichi sono differenziati tra configurazione utente MAD e PM.
Ventilazione	40 m ³ /h di aria di rinnovo per persona cui corrisponde un picco di tasso di rinnovo pari a 1.45 h ⁻¹ , con recuperatore ad efficienza ϵ pari a 75%, da lunedì a venerdì h. 07:00-17:00 Impianto non attivo da lunedì a venerdì h. 17:00-07:00 e nel week-end

Tab. 4.6: condizioni di temperatura, umidità relativa, carichi interni e ventilazione per il caso B.

Profilo di temperature di set-point invernali	20.5°C costante
Profilo di temperature e umidità relativa di set-point estive	25.5°C costante, deumidificazione assente
Carichi interni	30 unità uffici da 4 occupanti ciascuno, equivalenti alla presenza di 120 persone di picco. Il profilo di occupazione è generato dal software DAYSIM, ad ogni persona corrispondono 75 W di carico sensibile e 75 W di carico latente (secondo ISO 7730, 'light work'); a ciascuna persona è associato un PC corrispondente ad un carico di 140 W. Il carico di illuminazione è generato dal software DAYSIM e prevede un carico massimo di 15 W/m ² in riferimento alla superficie netta. I carichi sono differenziati tra configurazione utente MAD e PM.
Ventilazione	tasso di rinnovo n pari a 0.3 h ⁻¹ costante

Tab. 4.7: condizioni di temperatura, umidità relativa, carichi interni e ventilazione per il caso C.

Per quanto riguarda la climatizzazione invernale la stagione considerata è stata quella definita dalla legge italiana nei decreti precedentemente menzionati, ovvero dal 15 ottobre al 15 aprile per Milano (zona E), dall'1 aprile al 15 novembre per Roma (zona D), e dall'1 dicembre al 31 marzo per Palermo (zona B). Per quanto riguarda la climatizzazione estiva si sono considerate tutte le ore dell'anno non facenti parte della stagione di riscaldamento succitata per ciascuna località.

4.3 Risultati nel caso di edifici del settore terziario

Le Tab. 4.8, Tab. 4.9, Tab. 4.10 riportano i risultati delle simulazioni per il caso di edifici del settore terziario, con la distinzione tra utente oculato, MAD, e meno oculato, PM. I carichi di illuminazione e il fabbisogno di energia elettrica per le apparecchiature elettriche per le tipologie di utente MAD e PM sono riassunti in Tab. 4.11.

Soluzioni	Fabbisogno invernale		Fabbisogno estivo		
	Q_{Risc} [kWh·m ⁻²]	Q_{Raffr} [kWh·m ⁻²]	Q_{Sens} [kWh·m ⁻²]	Q_{Lat} [kWh·m ⁻²]	Q_{Totale} [kWh·m ⁻²]
A, MAD	9	2	57	10	67
A, PM	9	3	55	10	65
B, MAD	0	2	56	9	65
B, PM	0	3	54	9	63
C, MAD	10	3	55	0	55
C, PM	10	4	52	0	52

Tab. 4.8: risultati delle simulazioni per il clima di Milano.

Soluzioni	Fabbisogno invernale		Fabbisogno estivo		
	Q_{Risc} [kWh·m ⁻²]	Q_{Raffr} [kWh·m ⁻²]	Q_{Sens} [kWh·m ⁻²]	Q_{Lat} [kWh·m ⁻²]	Q_{Totale} [kWh·m ⁻²]
A, MAD	0	9	69	20	89
A, PM	0	8	65	21	86
B, MAD	0	10	70	15	85
B, PM	0	9	65	15	80
C, MAD	0	10	66	0	66
C, PM	0	9	62	0	62

Tab. 4.9: risultati delle simulazioni per il clima di Roma.

Soluzioni	Fabbisogno invernale		Fabbisogno estivo		
	Q_{Risc} [kWh·m ⁻²]	Q_{Raffr} [kWh·m ⁻²]	Q_{Sens} [kWh·m ⁻²]	Q_{Lat} [kWh·m ⁻²]	Q_{Totale} [kWh·m ⁻²]
A, MAD	0	8	98	27	125
A, PM	0	5	84	27	111
B, MAD	0	10	99	19	118
B, PM	0	6	84	19	103
C, MAD	0	9	99	0	99
C, PM	0	6	82	0	82

Tab. 4.10: risultati delle simulazioni per il clima di Palermo.

Tipologia utente	Fabbisogno per apparecchiature	Fabbisogno per illuminazione	Fabbisogno totale
	$W_{apparecchiature}$ [kWh _e ·m ⁻²]	$W_{illuminazione}$ [kWh _e ·m ⁻²]	W_{Totale} [kWh _e ·m ⁻²]
MAD	37	22	59
PM	37	40	77

Tab. 4.11: riassunto dei fabbisogni di energia elettrica per le varie tipologie di utente.

4.4 Discussione dei risultati nel caso di edifici del settore terziario

Con riferimento alle Tab. 4.8, Tab. 4.9, Tab. 4.10, si può osservare che solo nel clima di Milano vi è l'esigenza del riscaldamento invernale; tuttavia il fabbisogno di energia per il riscaldamento è molto ridotto rispetto quello per il raffrescamento estivo. Per la soluzione B, ovvero quella con profili di temperature e umidità relative di set point variabili ma con presenza del recuperatore di calore, esso è trascurabile, poiché per garantire il raggiungimento delle condizioni di set point vi è la necessità di asportare una quota dei carichi termici dovuti a occupanti ed apparecchiature. Per i casi finora considerati non si riscontra una significativa differenza tra fabbisogni per l'utente MAD e PM. Si ricorda, comunque, che gli edifici analizzati sono caratterizzati da elementi molto ben isolati termicamente. Per quanto riguarda il raffrescamento invernale, si segnala come per il clima di Milano questo sia piuttosto contenuto; in questo caso si nota un aumento relativo del fabbisogno per l'utente PM rispetto al MAD per il clima di Milano (del 50% per soluzioni A e B, e del 33% per soluzione C). Mentre, per il clima di Roma, si registra un aumento relativo nel passare da utente PM a MAD, del 13% per il caso A, e dell'11% per i casi B e C; per il clima di Palermo si registra un aumento relativo massimo del 67% per il caso B nel passare da utente PM a MAD. Tuttavia i fabbisogni assoluti per il raffrescamento invernale sono ridotti (inferiori a $10 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$), ed in ogni caso si segnala la possibilità di ricorrere al free cooling. Per la valutazione delle entità di tali fabbisogni si confrontino le Tab. 4.8, Tab. 4.9, Tab. 4.10.

Per quanto riguarda il fabbisogno di energia per il raffrescamento estivo, esso è in ogni caso la quota più onerosa nel totale fabbisogno di energia per la climatizzazione. In particolare, si nota che considerare la soluzione C, dunque trascurare la deumidificazione e mantenere un tasso di ricambi orari pari a 0.3 h^{-1} , rispetto quella A, ovvero con profili di temperature e umidità relative di set point variabili, porta ad un valore massimo della riduzione relativa del fabbisogno di circa il 20% per il clima di Milano, il 28% per Roma, ed il 26% per Palermo. Il fabbisogno legato all'utente MAD rispetto a quello PM genera, nel clima di Milano, un aumento relativo del 3% per le soluzioni A e B, e del 6% per la soluzione C; nel clima di Roma tale aumento relativo è di circa il 3% per la soluzione A, e del 6% per le soluzioni B e C. Per il clima di Palermo esso è di circa il 15% per la soluzione A, del 17% per la soluzione B, e del 23% per la soluzione C. La presenza del recuperatore (soluzione B rispetto A) comporta una riduzione del fabbisogno di

circa il 3% per il clima di Milano, e raggiunge il valore massimo del 7% per Roma, e del 6% per Palermo (utente PM).

Infine, il fabbisogno elettrico per l'illuminazione del caso PM è circa il doppio rispetto quello del caso MAD, ovvero quello in cui l'utente regola il carico di illuminazione ed i dispositivi di shading in funzione della radiazione esterna. Per un confronto più dettagliato dei risultati, ed in particolare dei valori assoluti dei fabbisogni, si rimanda a Tab. 4.8, Tab. 4.9 e Tab. 4.10.

4.5 Analisi di un edificio tipo del settore residenziale

4.5.1 Descrizione dell'edificio tipo

L'edificio tipo modellato per il caso residenziale si sviluppa su tre piani, con altezza interpiano di tre metri, con quattro unità abitative di superficie calpestabile pari a circa 94 m². Nell'edificio si distinguono due zone: la zona 1, riscaldata e corrispondente alla superficie occupata dagli appartamenti, e la zona 2, non riscaldata, che corrisponde al vano scala in comune. In Tab. 4.12 si riportano le caratteristiche dell'edificio simulato; la Fig. 4.5.1 rappresenta la pianta di un piano tipo.

Superficie Totale Lorda [m ²]	1200
Superficie Totale Netta [m ²]	1020
Volume Totale Lordo [m ³]	3600
Volume Totale Netto [m ³]	3060
Superficie Riscaldata Totale Lorda [m ²]	1125
Superficie Riscaldata Totale Netta [m ²]	956
Superficie Non Riscaldata Totale Lorda [m ²]	75
Superficie Non Riscaldata Totale Netta [m ²]	64
Superficie Finestrata Totale [m ²]	121
Superficie del Telaio [m ²]	18.2

Tab. 4.12: caratteristiche dell'edificio tipo simulato per il settore residenziale.

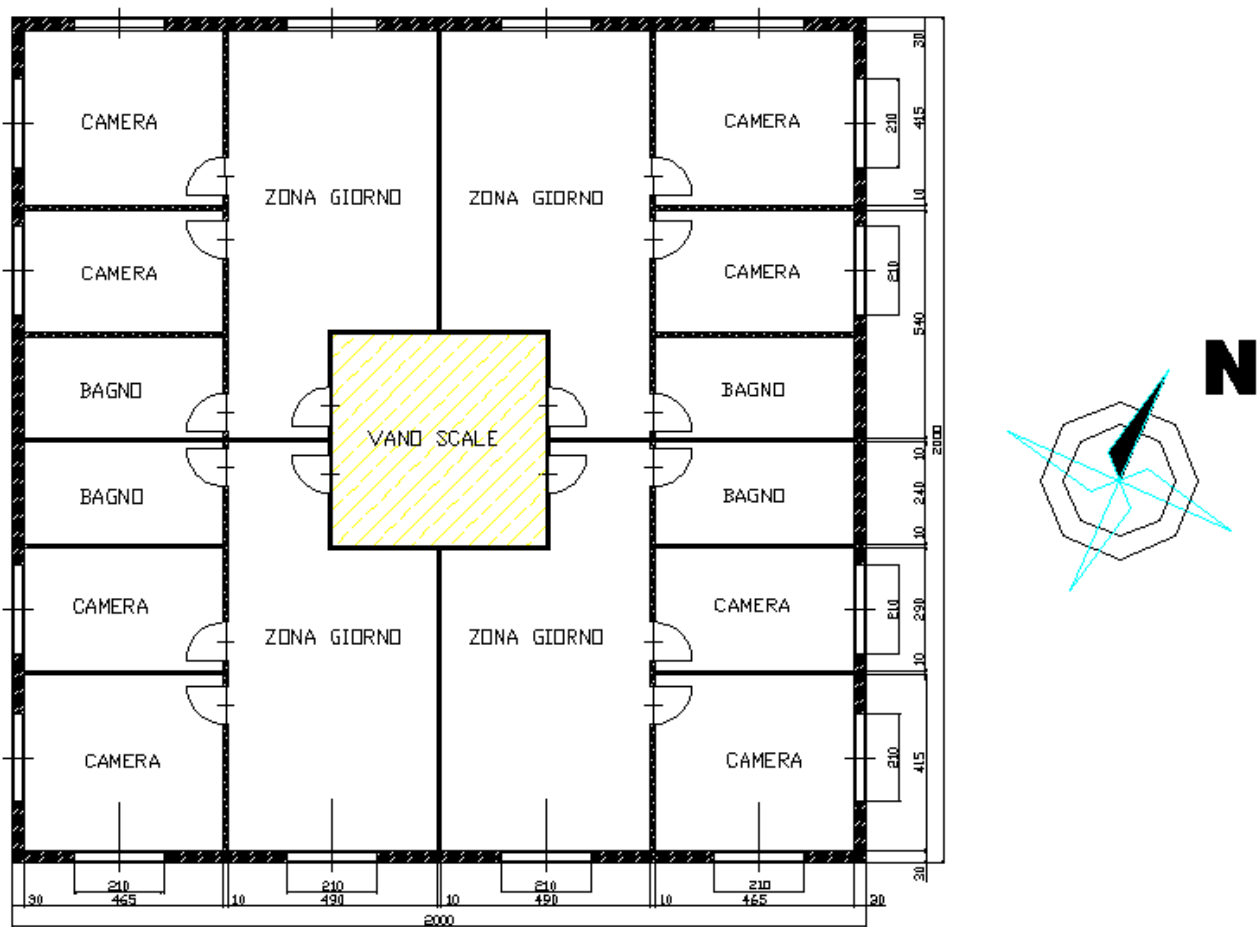


Fig. 4.5.1: pianta del piano tipo realizzato nell'edificio in analisi (quote in cm).

Le strutture utilizzate sono di due tipi differenti, uno massivo in laterizio ed uno più leggero in legno: entrambe le tipologie presentano elevate prestazioni di isolamento termico con valori di trasmittanza termica inferiori allo standard edilizio minimo richiesto dalle attuali leggi vigenti in Italia DLgs 192/05 2005, DLgs 311/06 2006, DPR 59/09 2009. Il confronto è stato eseguito a parità di trasmittanza delle strutture stesse. Al variare della zona climatica, dalla E alla B, si sono variate le strutture, mediante riduzione progressiva dello spessore di isolante, utilizzando anche elementi finestrati con differenti prestazioni energetiche; in tal modo si è cercato di influire nella minore misura possibile sulle caratteristiche di capacità termica dell'edificio stesso. Per semplicità di esposizione si riportano nelle Tab. 4.13, Tab. 4.14, Tab. 4.15 solo le caratteristiche di trasmittanza delle strutture utilizzate.

	U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
Parete esterna	0.270
Tetto	0.257
Solaio interpiano	0.565
Solaio controterra	0.290
Parete divisoria interna	1.430
Parete verso ambiente non riscaldato	0.370
Superficie vetrata (vetro + telaio)	U = $1.700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; g = 0.60

Tab. 4.13: caratteristiche delle strutture utilizzate per l'edificio tipo nel clima di Milano.

	U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
Parete esterna	0.290
Tetto	0.260
Solaio interpiano	0.565
Solaio controterra	0.305
Parete divisoria interna	1.430
Parete verso ambiente non riscaldato	0.370
Superficie vetrata (vetro + telaio)	U = $1.700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; g = 0.60

Tab. 4.14: caratteristiche delle strutture utilizzate per l'edificio tipo nel clima di Roma.

	U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
Parete esterna	0.390
Tetto	0.320
Solaio interpiano	0.565
Solaio controterra	0.360
Parete divisoria interna	1.430
Parete verso ambiente non riscaldato	0.480
Superficie vetrata (vetro + telaio)	U = $2.700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; g = 0.80

Tab. 4.15: caratteristiche delle strutture utilizzate per l'edificio tipo nel clima di Palermo.

4.5.2 *Descrizione del procedimento*

Sono state considerate quattro soluzioni (denominate A, B, C e D), che si differenziano per i diversi profili di temperature di set-point e umidità relativa (RH) imposte e per due gestioni differenti della ventilazione. Per quanto riguarda i carichi interni, si è seguito quanto indicato nel prospetto 9 della UNI/TS 11300-1:2008, facendo un'ulteriore distinzione tra carichi sensibili e latenti. Le soluzioni implementate sono riportate in Tab. 4.16, Tab. 4.17, Tab. 4.18 e Tab. 4.19.

Profilo di temperature di set-point invernali	21°C da lunedì a venerdì e week end h. 07:00-17:00 18°C da lunedì a venerdì e week end h. 17:00-07:00
Profilo di temperature e umidità relativa di set-point estive	25.5°C, RH=50% da lunedì a venerdì e week end h. 07:00-17:00 28°C, RH=60% da lunedì a venerdì e week end h. 17:00-07:00
Carichi interni	12 unità abitative con la presenza costante di 2 occupanti ciascuno, equivalenti alla presenza costante di 24 persone. Ad ogni persona corrispondono 65 W di carico sensibile e 75 W di carico latente secondo ISO 7730 ('very light writing'). Il restante apporto per raggiungere quanto espresso nel prospetto 9 di UNI/TS 11300-1:2008 è imposto sotto forma di carico equamente ripartito in convettivo e radiante.
Ventilazione	n=0.3 h ⁻¹ costante

Tab. 4.16: condizioni di temperatura, umidità relativa, carichi interni e ventilazione per la Soluzione A edifici residenziali.

Profilo di temperature di set-point invernali	20.5°C costante
Profilo di temperature e umidità relativa di set-point estive	25.5°C costante, deumidificazione assente
Carichi interni	12 unità abitative con la presenza costante di 2 occupanti ciascuno, equivalenti alla presenza costante di 24 persone. Ad ogni persona corrispondono 65 W di carico sensibile e 75 W di carico latente secondo ISO 7730 ('very light writing'). Il restante apporto per raggiungere quanto espresso nel prospetto 9 di UNI/TS 11300-1:2008 è imposto sotto forma di carico equamente ripartito in convettivo e radiante.
Ventilazione	n=0.3 h ⁻¹ costante

Tab. 4.17: condizioni di temperatura, umidità relativa, carichi interni e ventilazione per la Soluzione B edifici residenziali.

Profilo di temperature di set-point invernali	21°C da lunedì a venerdì e week end h. 07:00-17:00 18°C da lunedì a venerdì e week end h. 17:00-07:00
Profilo di temperature e umidità relativa di set-point estive	25.5°C, RH=50% da lunedì a venerdì e week end h. 07:00-17:00 28°C, RH=60% da lunedì a venerdì e week end h. 23:00-07:00
Carichi interni	12 unità abitative con la presenza costante di 2 occupanti ciascuno, equivalenti alla presenza costante di 24 persone. Ad ogni persona corrispondono 65 W di carico sensibile e 75 W di carico latente secondo ISO 7730 ('very light writing'). Il restante apporto per raggiungere quanto espresso nel prospetto 9 di UNI/TS 11300-1:2008 è imposto sotto forma di carico equamente ripartito in convettivo e radiante.
Ventilazione	$n=0.5 \text{ h}^{-1}$ costante

Tab. 4.18: condizioni di temperatura, umidità relativa, carichi interni e ventilazione per la Soluzione C edifici residenziali.

Profilo di temperature di set-point invernali	20.5°C costante
Profilo di temperature e umidità relativa di set-point estive	25.5°C costante, deumidificazione assente
Carichi interni	12 unità abitative con la presenza costante di 2 occupanti ciascuno, equivalenti alla presenza costante di 24 persone. Ad ogni persona corrispondono 65 W di carico sensibile e 75 W di carico latente secondo ISO 7730 ('very light writing'). Il restante apporto per raggiungere quanto espresso nel prospetto 9 di UNI/TS 11300-1:2008 è imposto sotto forma di carico equamente ripartito in convettivo e radiante.
Ventilazione	$n=0.5 \text{ h}^{-1}$ costante

Tab. 4.19: condizioni di temperatura, umidità relativa, carichi interni e ventilazione per la Soluzione D edifici residenziali.

Come nel caso di edifici del settore terziario, per la climatizzazione invernale la stagione considerata è stata quella definita dalla legge italiana nei decreti precedentemente menzionati, ovvero dal 15 ottobre al 15 aprile per Milano (zona E), dall'1 aprile al 15 novembre per Roma (zona D), e dall'1 dicembre al 31 marzo per Palermo (zona B). Per quanto riguarda la climatizzazione estiva si sono considerate tutte le ore dell'anno non facenti parte della stagione di riscaldamento sopraccitata per ciascuna località.

Infine, poiché si tratta di edifici residenziali, si è considerato anche il fabbisogno di acqua calda sanitaria (ACS) secondo quanto descritto in UNI/TS 11300-2:2008.

$$Q_{h,W} = \rho_W \cdot c_W \cdot V_W \cdot (\theta_{er} - \theta_0) \cdot G$$

Eq. 4.1

dove

V_w volume dell'acqua richiesta durante il periodo di calcolo [$m^3 \cdot G^{-1}$]

θ_{er} temperatura di erogazione [$^{\circ}C$]

θ_0 temperatura di ingresso dell'acqua di rete [$^{\circ}C$]

G numero di giorni del periodo di calcolo [G]

Come da UNI/TS 11300-2:2008 si è considerata una differenza di temperatura tra l'acqua fredda sanitaria e l'erogazione pari a $25^{\circ}C$; il fabbisogno così ottenuto è riportato in Tab. 4.15.

$Q_{h,w} [kWh \cdot m^{-2}]$	17
------------------------------	----

Tab. 4.20: fabbisogno di acqua calda sanitaria per l'edificio residenziale nei climi considerati.

4.6 Risultati nel caso di edifici nel settore residenziale

Le Tab. 4.21, Tab. 4.22, Tab. 4.23 riportano i risultati delle simulazioni per i tre diversi climi considerati: si è distinto fra le quattro soluzioni A, B, C e D massive e leggere, come menzionato nella sezione 4.5.2.

Soluzioni	Fabbisogno invernale	Fabbisogno estivo		
	Q_{Risc} [kWh·m ⁻²]	Q_{Sens} [kWh·m ⁻²]	Q_{Lat} [kWh·m ⁻²]	Q_{Totale} [kWh·m ⁻²]
A Massiva	37	12	4	16
B Massiva	39	14	0	14
C Massiva	52	10	5	15
D Massiva	56	11	0	11
A Leggera	34	11	5	16
B Leggera	39	13	0	13
C Leggera	50	9	7	16
D Leggera	56	11	0	11

Tab. 4.21: risultati delle simulazioni per il clima di Milano.

Soluzioni	Fabbisogno invernale	Fabbisogno estivo		
	Q_{Risc} [kWh·m ⁻²]	Q_{Sens} [kWh·m ⁻²]	Q_{Lat} [kWh·m ⁻²]	Q_{Totale} [kWh·m ⁻²]
A Massiva	12	23	10	33
B Massiva	12	24	0	24
C Massiva	20	20	15	35
D Massiva	22	21	0	21
A Leggera	11	20	10	30
B Leggera	13	23	0	23
C Leggera	19	18	15	33
D Leggera	23	20	0	20

Tab. 4.22: risultati delle simulazioni per il clima di Roma.

Soluzioni	Fabbisogno invernale	Fabbisogno estivo		
	Q_{Risc} [kWh·m ⁻²]	Q_{Sens} [kWh·m ⁻²]	Q_{Lat} [kWh·m ⁻²]	Q_{Totale} [kWh·m ⁻²]
A Massiva	4	36	14	50
B Massiva	4	39	0	39
C Massiva	8	33	19	52
D Massiva	8	37	0	37
A Leggera	4	31	14	45
B Leggera	5	36	0	36
C Leggera	7	29	20	49
D Leggera	10	34	0	34

Tab. 4.23: risultati delle simulazioni per il clima di Palermo.

4.7 Discussione dei risultati nel caso di edifici nel settore residenziale

Con riferimento alle Tab. 4.21, Tab. 4.22 e Tab. 4.23 si può osservare che nel passare da soluzione massiva a quella in legno in regime invernale, si registrano una diminuzione relativa dell'8% e del 4% rispettivamente per le soluzioni A e C, e nessuna significativa variazione per le soluzioni B e D nel clima di Milano; per il clima di Roma si ha invece una diminuzione relativa dell'8% e del 5% rispettivamente per le soluzioni A e C, mentre si ha un aumento relativo dell'8% e del 5% per le soluzioni B e D. Per il clima di Palermo si riscontrano un aumento del 25% per i casi B e D, una diminuzione del 13% per il caso C e nessuna variazione significativa per la soluzione A. Il fabbisogno per la climatizzazione invernale rispetto quella estiva è marcato nel clima di Milano, ma diventa via via meno oneroso per i climi di Roma e di Palermo. La considerazione di temperature di set point costanti e nessuna deumidificazione rispetto ai profili variabili, ovvero le soluzioni B e D rispetto le A e C, comporta un aumento relativo della valutazione del fabbisogno invernale che raggiunge il picco del 15% per il clima di Milano (da soluzione A a B, struttura leggera), del 21% per quello di Roma (da soluzione C a D, struttura leggera), e del 43% per quello di Palermo (da soluzione C a D, struttura leggera). La variazione del tasso di ricambio orario n da 0.3 h^{-1} a 0.5 h^{-1} , comporta un valore massimo di aumento relativo del fabbisogno per la climatizzazione invernale di circa il 47% per il clima di Milano (da soluzione A a C, struttura massiva), dell'83% per quello di Roma (da soluzione B a D, struttura massiva), e di circa il 100% per il clima di Palermo (da soluzione A a C, struttura massiva).

Per quanto riguarda il fabbisogno per il raffrescamento, il confronto tra soluzione massiva e in legno genera per il clima di Milano un aumento relativo del 7% per il caso C, una diminuzione relativa del 7% per il caso B, e nessuna variazione significativa per i casi B e D. Per i climi di Roma, il caso di strutture leggere comporta una diminuzione relativa del fabbisogno per tutte le soluzioni, con i valori massimi relativi del 9% e 10% per le soluzioni A nei climi di Roma e Palermo. La considerazione di temperature di set point costanti e nessuna deumidificazione rispetto ai profili variabili, ovvero le soluzioni B e D rispetto le A e C, causa notevoli variazioni nel fabbisogno per la climatizzazione estiva; per tutti i climi considerati si raggiunge una diminuzione del fabbisogno, con valore massimo relativo del 31% per Milano (da soluzione C a D, struttura leggera), del 40% per Roma (da soluzione C a D, strutture massiva e legno), del 31% per Palermo (da soluzione C a D, struttura leggera). La variazione del tasso di ricambi orari n da 0.3 h^{-1} a 0.5 h^{-1} comporta una diminuzione relativa massima del 6% per il clima di Milano (da

soluzione A a C, struttura massiva), mentre causa un aumento relativo massimo del 10% per il caso di Roma (da soluzione A a C, struttura leggera) e del 9% per il clima di Palermo (da soluzione A a C, struttura leggera). Quanto ora asserito per il fabbisogno per la climatizzazione estiva si riferisce al fabbisogno globale; per la distinzione tra quota sensibile e latente si confrontino le Tab. 4.21, Tab. 4.22 e Tab. 4.23.

4.8 Conclusioni

I risultati delle simulazioni dinamiche in 4.3 e 4.6 mettono in evidenza alcuni aspetti. Per quanto riguarda il caso degli uffici, per i tre climi considerati si è evidenziato come sia necessario il raffrescamento anche in inverno: si segnala quindi la possibilità di ricorrere al free cooling. Nel settore terziario, data l'entità dei carichi interni, il fabbisogno per il riscaldamento rappresenta una quota minoritaria dell'intero fabbisogno per la climatizzazione, pertanto si segnala come l'aspetto fondamentale da considerare per questa tipologia edilizia in sede di progettazione sia il raffrescamento estivo, non solo sensibile, ma anche latente. Inoltre all'utente PM, ovvero quello meno oculato nella gestione dei dispositivi di shading e dell'illuminazione, corrisponde il minor fabbisogno netto dell'edificio (in particolare si ha circa il 15% di aumento relativo del fabbisogno netto per la climatizzazione estiva nel clima di Palermo per la soluzione con recuperatore, nel passare da utente PM a utente MAD), tuttavia è da sottolineare che il fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione pressoché raddoppia nel passare da utente MAD a utente PM. La presenza del recuperatore è apparsa molto utile in inverno per il solo riscaldamento nel clima di Milano, dove il fabbisogno si è ridotto da $10 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ a $0 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, mentre d'estate si è osservata una diminuzione relativa di circa il 3% della richiesta di energia rispetto alla soluzione senza recuperatore. Nei climi di Roma e Palermo, dove il riscaldamento invernale appare trascurabile, la riduzione del fabbisogno di energia per la climatizzazione estiva è stata tra 4%-7% con la presenza del recuperatore (soluzione B rispetto ad A). Si noti che le simulazioni di tipo C sono coerenti con le condizioni al contorno disposte dalla UNI/TS 11300-1:2008, mentre le simulazioni di tipo A e B tengono conto dei valori orari di affollamento mediante simulazione con software DAYSIM (NRCC 2010). I valori dei fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva considerando la tipologia C sono decisamente inferiori rispetto alla soluzione A (valore massimo di riduzione relativa di 28% nel clima di Roma nel passare da soluzione C ad A), pertanto è consigliabile una revisione delle condizioni al contorno e del set-point per i calcoli della UNI/TS 11300-1:2008 per quanto riguarda il settore terziario. Per quanto riguarda il riscaldamento, adottando l'approccio della UNI/TS 11300-1:2008 nel clima di Milano si registra un aumento del fabbisogno di energia per la climatizzazione (circa il 10% di aumento relativo della soluzione C rispetto ad A); anche per i casi di raffrescamento invernale nei climi considerati si registra un aumento del carico richiesto (circa il 10% di aumento relativo). Dunque

il calcolo secondo valutazioni standard o di progetto UNI/TS 11300-1:2008 in regime invernale porta ad una sovrastima dei carichi.

Per quanto riguarda gli edifici del settore residenziale, si è evidenziato come la quota per il raffrescamento costituisca il maggiore onere per la climatizzazione per i climi di Roma e Palermo, mentre in quello di Milano i maggiori carichi sono richiesti per il riscaldamento. Nel passare da struttura massiva a leggera, per il clima di Milano si registra la diminuzione massima dell'8% per il caso A in regime invernale (una diminuzione si riscontra anche per il caso C), e nessuna variazione in due casi (B e D); per il caso estivo si riscontrano valori simili dei fabbisogni per le varie soluzioni considerate. Per i climi di Roma e Palermo, in particolare riguardo il fabbisogno per il raffrescamento, il caso di strutture leggere comporta una diminuzione relativa del fabbisogno per tutte le soluzioni (Tab. 4.21, Tab. 4.22 e Tab. 4.23). Per il settore residenziale si è notato come considerare una temperatura costante di set-point, come da approccio standard o di progetto della UNI/TS 11300-1:2008, abbia generato un aumento della quota richiesta per il fabbisogno sensibile di riscaldamento, con il picco del 15% per il clima di Milano (da soluzione A a B legno) dove il fabbisogno per il riscaldamento è più rilevante, dunque porta ad una sovrastima del carico. Per quanto riguarda la climatizzazione estiva, occorre evidenziare come il contributo della deumidificazione non sia trascurabile, specialmente nei climi più caldi; considerare l'approccio di progetto di UNI/TS 11300-1:2008 porta ad una sottostima del fabbisogno per la climatizzazione estiva per edifici del settore residenziale rispetto alla valutazione del fabbisogno latente, con il picco del 40% nel clima di Roma (da soluzione C a D struttura massiva e in legno).

Dunque l'approccio di progetto o standard della UNI/TS 11300-1:2008, secondo quanto messo in luce da questo lavoro, porta ad una sovrastima del fabbisogno per la climatizzazione invernale, quindi in favore di sicurezza, mentre causa una notevole sottostima del fabbisogno per la climatizzazione in regime estivo.

4.9 Bibliografia

DLgs 192/05. «Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.» Gazzetta Ufficiale n.222 del 23 Settembre 2005 suppl. ord. n. 158, 19 Agosto 2005.

DLgs 311/06. «Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311. Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.» Gazzetta Ufficiale n.26 del 1 Febbraio 2007 suppl. ord. n. 26/L., 29 Dicembre 2006.

DPR 412/93. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia. Gazzetta Ufficiale n.96 del 14/10/1993 in attuazione dell'art. 4, comma 4 della Legge 9 Gennaio 1991, N.10, Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, 1993.

DPR 59/09. «Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009 , n. 59. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico.» Gazzetta Ufficiale n.132 del 10 Giugno 2009, 2 Aprile 2009.

EN ISO 13790:2008. «Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling.» 2008.

ENERGY PLUS. «ENERGY PLUS Energy Simulation Software, U.S. Department of Energy.» 2010.

TRNSYS. *TRNSYS Manual, A Transient Simulation Program*. Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison, 2000.

NRCC. *DAYSIM, Dynamic Daylight Simulations*. National Research Council Canada, 2010.

UNI/TS 11300-1:2008. «Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.» 2008.

UNI/TS 11300-2:2008. «Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e la produzione di acqua calda sanitaria.» 2008.

5 Capitolo 5. Retrofit di impianti di riscaldamento ed ottimizzazione del sistema edificio-impianto

Riassunto

In questo capitolo si discute uno studio relativo a edifici tipo per la climatizzazione invernale in cui si mira all'ottimizzazione del sistema edificio impianto per la stagione di riscaldamento. Due diversi edifici tipo, uno fortemente isolato ed uno non isolato e con le stesse caratteristiche geometriche, sono considerati in due climi differenti; sono variate le strategie di gestione del sistema di riscaldamento e i sistemi di conversione dell'energia termica, e si osserva la modalità più vantaggiosa in termini di consumo di energia che garantisca al contempo le condizioni di comfort. In particolare, in riferimento ad un edificio non isolato termicamente (ad esempio edifici storici), con sistema di generazione tradizionale di calore con radiatori, si segnala la possibilità di ottenere un considerevole risparmio energetico per il riscaldamento se si adotta una caldaia a condensazione con un adeguato sistema di controllo e regolazione, e lasciando invariato il sistema di emissione. Si segue questo approccio poiché molti edifici esistenti, ad esempio quelli storici, non possono essere riqualificati in termini di isolamento termico, ma è possibile agire sull'impianto e sul sistema di conversione dell'energia (retrofit). Si considerano sia il caso di edifici singoli, sia di reti di teleriscaldamento. Inoltre, si esegue uno studio per individuare il miglior impianto e sistema di generazione per edifici termicamente ben isolati, nuovi o che siano stati sottoposti ad intervento di coibentazione dell'involucro.

5.1 I sistemi di conversione dell'energia

Come riportato da Busato in (Busato 2005), i sistemi di conversione dell'energia termica hanno subito un'evoluzione dagli anni '60 ad oggi in Europa. Ai tradizionali sistemi ad olio combustibile si sono via via affiancati in maniera sempre più rilevante, generatori a gas naturale, fino ad arrivare ai sistemi a pompa di calore. E' da sottolineare come, specialmente con la diffusione di sistemi autonomi negli anni '80, la potenza complessiva installata fosse, di fatto, superiore rispetto alla potenza di un corrispondente impianto centralizzato: dunque, le caldaie disponibili generavano una potenza quasi sempre esuberante rispetto al fabbisogno di riscaldamento dell'utenza ed erano prive di dispositivi di modulazione della potenza erogata, mentre gli impianti di tipo centralizzato erano molto spesso dotati di sistema di regolazione del tipo a 'compensazione climatica' (la temperatura di mandata è stabilita in funzione della temperatura esterna) o addirittura di dispositivo di modulazione (giustificato vista la taglia dell'impianto). Le caratteristiche delle prime caldaie degli anni '60 erano identificabili in bruciatore atmosferico con sistema di circolazione a tiraggio naturale, accensione con fiamma pilota, sistema di regolazione ON/OFF, temperatura di mandata fissa. Le ingenti perdite presenti anche durante il funzionamento a regime determinavano un rendimento nominale pari all'85% (Busato 2005). Analizzando quanto esposto in (De Carli, et al. 2007) si vede come in Italia oltre diciassette milioni di abitazioni siano state edificate prima dell'avvento della Legge 373/76 che introdusse un'attenzione progettuale al contenimento delle dispersioni energetiche.

In Fig. 5.1.1 si riporta la ripartizione degli impianti termici in Italia per epoca di costruzione.

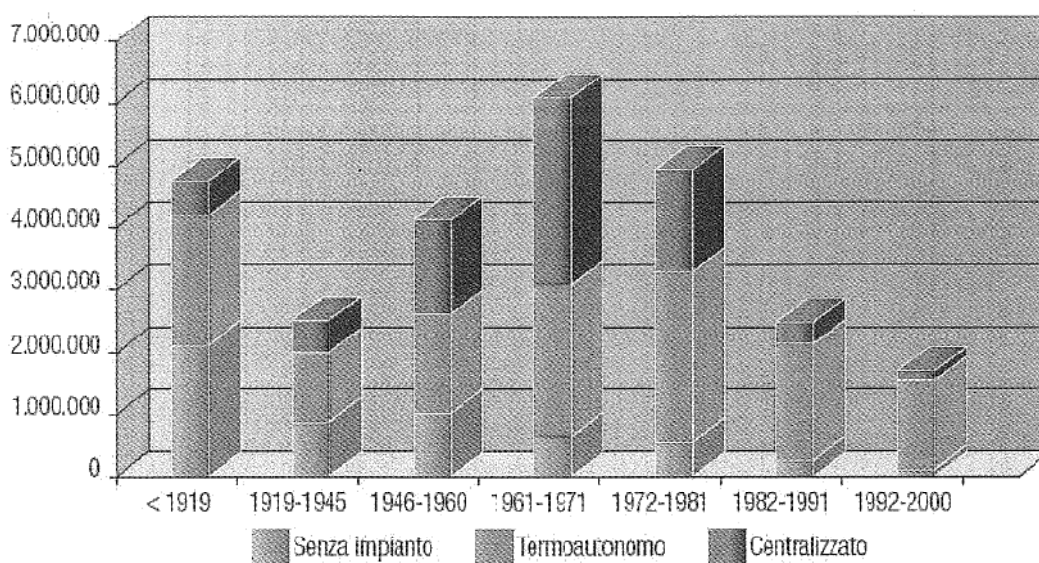


Fig. 5.1.1: numero e tipologia di impianti per epoca di costruzione in Italia, fonte: (De Carli, et al. 2007).

Negli anni '80 venne introdotta sul mercato la caldaia ad alto rendimento, in cui si realizzava una combustione che, riducendo l'eccesso d'aria, riduceva le perdite al camino: in tal modo il rendimento nominale arrivava al 90% (Busato 2005). Alla fine degli anni '80 si resero disponibili i generatori di calore che avevano come caratteristica dominante la portata variabile di miscela, con conseguente modulazione continua della potenza termica erogata; così la caldaia poteva rendere disponibile una potenza variabile, e quindi 'adattarsi' alle richieste dell'edificio. Ciò è di fondamentale importanza sulla scorta delle considerazioni riguardo al sovradimensionamento del generatore rispetto al fabbisogno di picco, poiché la modulazione della potenza permette di innalzare il valore del rendimento medio stagionale. Inoltre la modulazione consente di beneficiare dell'aumento di efficienza dello scambio termico dato dall'aumento del tempo di residenza dei fumi in caldaia, dunque se nelle caldaie tradizionali la curva di rendimento è decrescente con la parzializzazione, nelle caldaie a modulazione la curva è crescente con il diminuire del fattore di carico fino alla frazione di carico minimo realizzabile tecnicamente che, a seconda dei modelli di caldaia, si colloca tra il 18% e il 30% della potenza termica utile. E' poi da precisare come, se le richieste dell'edificio/impianto sono elevate rispetto alla taglia di generatori presenti sul mercato come può accadere nel caso di un condominio, la potenza può essere frazionata tramite l'accoppiamento di più generatori monostadio (al limite anche di tipo non modulante): la curva di rendimento risultante è dunque a gradini. La riduzione della potenza termica comporta una riduzione della temperatura dei fumi, che genera un aumento

del rendimento istantaneo, ma vi è un limite tecnico all'abbassamento della temperatura dei fumi, costituito dalla condensazione di vapori che, data la natura della combustione possono contenere componenti acide, sulle pareti del corpo caldaia. La caldaia a condensazione sfrutta invece anche tali potenzialità; in particolare, considerando che dalla combustione di 1 kg di metano si ottengono 2.2 kg di vapor d'acqua e che il PCI del metano è pari a $34500 \text{ kJ}\cdot\text{Sm}^{-3}$, si ottengono per ogni Sm^3 di gas combustibile, circa 4000 kJ di calore latente. Pertanto il recupero del calore latente dei fumi permette di recuperare fino all'11% dell'energia resa disponibile dalla combustione. Busato in (Busato 2005) riporta un'analisi di combustione per un combustibile composto (in frazione volumetrica) per il 97% da metano, per il 2% da etano e per l'1% da azoto, in Fig. 5.1.2 sono esposti i risultati di tale analisi.

A titolo di esempio si riportano, nelle Fig. 5.1.3 (A) e (B), le curve di rendimento di sistemi tradizionali, modulanti e a condensazione.

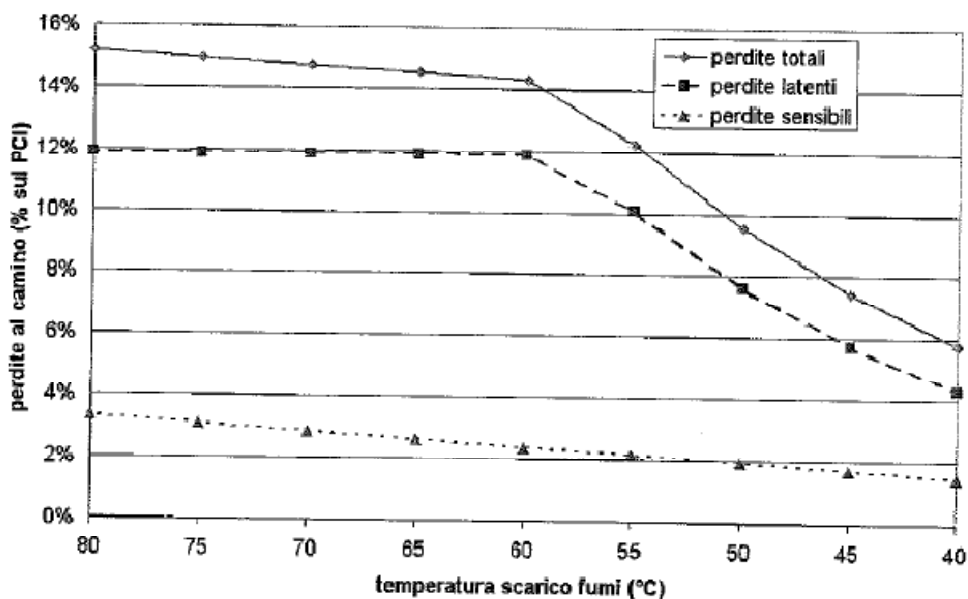
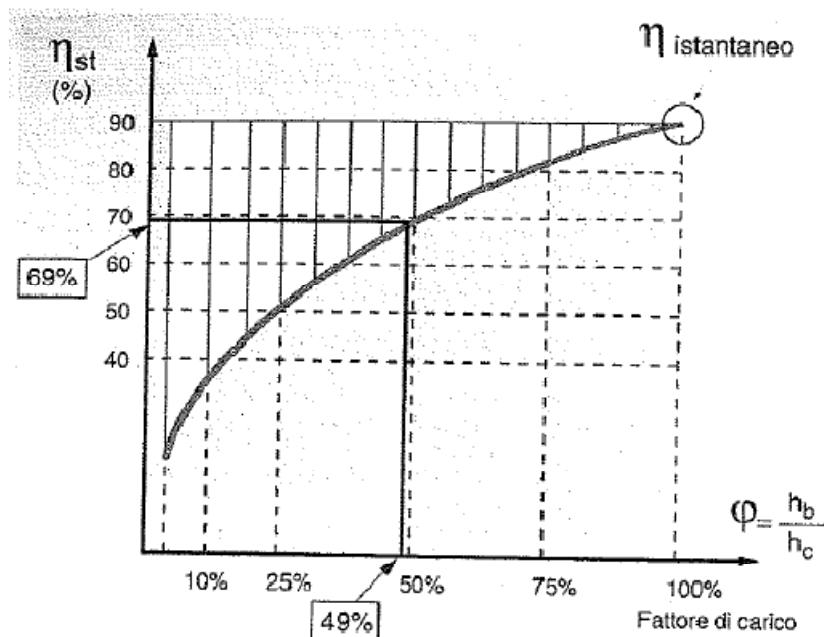
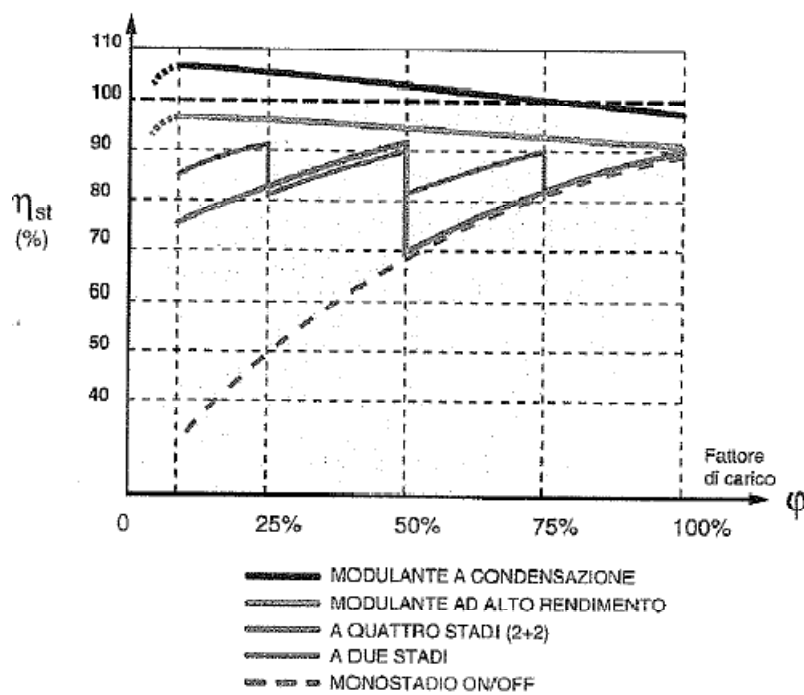


Fig. 5.1.2: perdite al camino in funzione della temperatura di scarico dei fumi, fonte: Busato in (Busato 2005).



(A)



(B)

Fig. 5.1.3: (A) curva del rendimento per una caldaia di tipo tradizionale, (B) curve di rendimento per sistemi modulanti e a condensazione, fonte: Busato in (Busato 2005).

In Fig. 5.1.4 si riporta una valutazione comparativa delle prestazioni di una caldaia a condensazione ed una ad alto rendimento.

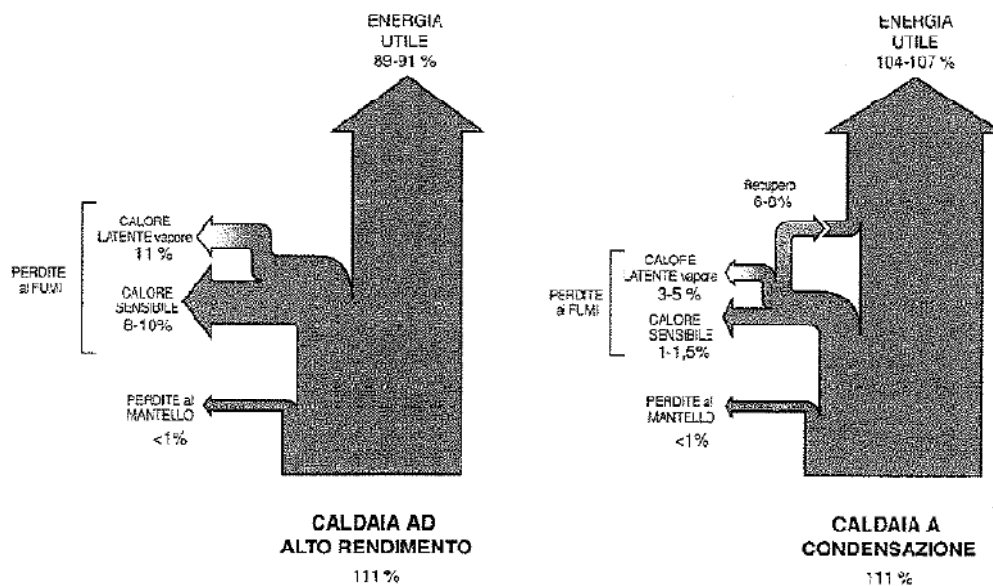


Fig. 5.1.4: perdite ed efficienze di caldaie ad alto rendimento e a condensazione in funzione del PCI, fonte Busato in (Busato 2005).

Un limite evidente alla temperatura di scarico dei fumi è dato dalla temperatura di ritorno del fluido termovettore dall'impianto, perciò la temperatura di ritorno dovrebbe essere la più ridotta possibile per favorire la condensazione: a tal fine, la caldaia a condensazione dovrebbe essere accoppiata ad impianti di riscaldamento a bassa temperatura, ovvero sistemi radianti, e potrebbe sembrare meno conveniente l'accoppiamento di tale tecnologia ad impianti con terminali del tipo a radiatori, i quali hanno temperature di alimentazione di norma superiori al limite di condensazione. In realtà tale considerazione non tiene conto del fatto che l'alimentazione a temperatura nominale si realizza in condizioni di progetto, ovvero per un ridotto numero di ore all'anno, dunque, come disposto ai fini di questo lavoro, si può pensare di alimentare i terminali ad una temperatura variabile che garantisca la condensazione per buona parte del periodo di funzionamento.

Per quanto riguarda questo studio, si è considerata anche la tecnologia delle pompe di calore, ovvero (Cavallini e Mattarolo 1992) 'installazioni che prelevano calore da una sorgente a temperatura più bassa e lo rendono disponibile (assieme all'equivalente termico dell'energia impiegata per rendere possibile quest'operazione) per utilizzo esterno a una temperatura mediamente superiore. Dal punto di vista del principio operativo non vi sono differenze tra un'installazione frigorifera (operante secondo ciclo inverso) ed una a pompa di calore: la differenza sta in ciò che costituisce l'effetto utile dell'installazione, ovvero l'asporto di calore da un sistema a temperatura inferiore a quella ambiente per un impianto frigorifero e la cessione di

calore ad un sistema a temperatura superiore a quella ambiente per una pompa di calore'. Per una descrizione più dettagliata dei principi di funzionamento della pompa di calore si rimanda a (Cavallini e Mattarolo 1992) e (Schibuola 1999). A titolo di esempio si riportano le curve di COP di una pompa di calore per diverse temperature di evaporazione e condensazione citate da Schibuola in (Schibuola 1999): si nota l'effetto dovuto all'irreversibilità esterna per la significativa differenza di temperatura necessaria per lo scambio termico tra ciascuna sorgente e il fluido interno. Quest'ultima è di norma la causa principale di riduzione delle prestazioni, dunque il comportamento della macchina può essere espresso in funzione proprio dei livelli termici all'evaporatore e al condensatore.

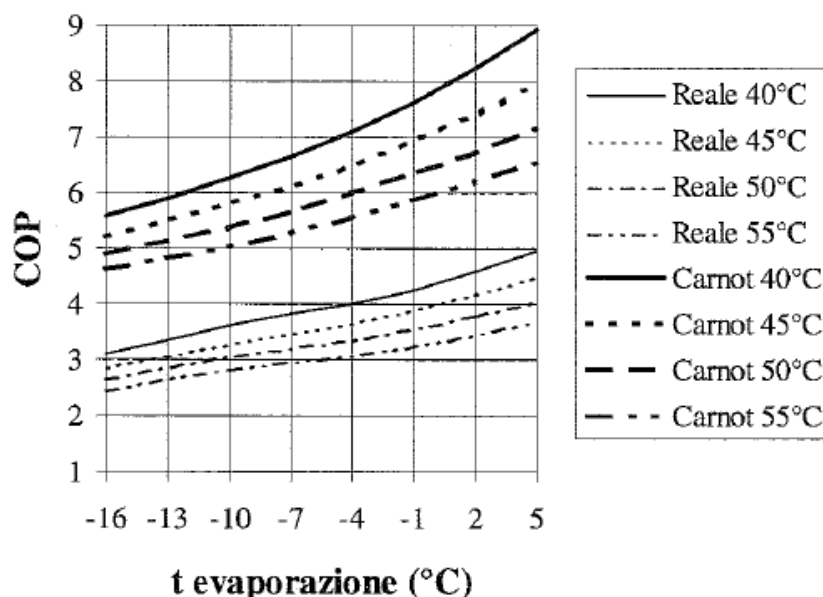


Fig. 5.1.5: coefficienti di prestazione (COP) di una pompa di calore commerciale per diverse temperature di condensazione ed evaporazione confrontati con quelle di un ciclo di Carnot inverso tra le stesse temperature, fonte: (Schibuola 1999).

In (De Carli, et al. 2007) si sottolinea la necessità di considerare le implicazioni dell'inerzia termica sulle modalità operative ottimali dell'impianto di produzione di calore: l'inerzia termica, infatti, caratterizza la capacità di un edificio di mantenere un certo livello di temperatura interna nel tempo e di poter sfruttare adeguatamente gli apporti gratuiti. Il comportamento termico dell'edificio, dunque, non può essere considerato indipendente da quello del sistema di generazione e distribuzione del calore. Per quanto riguarda il sistema a condensazione, si ribadisce come l'efficienza aumenti quando la temperatura di ritorno dell'impianto sia la più bassa possibile, la caldaia funzioni il più a lungo possibile a bassa potenza (ovvero fattore di

carico ridotto), minimizzando in tal modo la differenza di temperatura tra acqua e fumi, e l'eccesso d'aria sia limitato. Quest'ultima condizione è legata alla tecnologia costruttiva della caldaia stessa, le prime due condizioni, invece, sono correlate al tempo di accensione dell'impianto ovvero, maggiore è il tempo di funzionamento dell'impianto (funzionamento continuo anziché discontinuo o intermittente), maggiore è la riduzione della temperatura media richiesta ai corpi di scambio poiché si riduce la potenza termica istantanea richiesta dall'edificio, con conseguente aumento del rendimento medio stagionale. Quindi nel caso di caldaie a condensazione la scelta del funzionamento continuo si rivela efficace. Le stesse considerazioni valgono per la pompa di calore: minore è la differenza di temperatura tra sorgente fredda e pozzo caldo, maggiore è il COP. Il lavoro descritto in questo capitolo si sviluppa a partire da questi presupposti.

5.2 Analisi di diverse soluzioni per il riscaldamento in edifici esistenti e nuovi

Si è definito l'edificio tipo con TRNSYS (TRNSYS 2000) per la determinazione del fabbisogno netto lato edificio su base oraria, successivamente sono state implementate le procedure secondo il metodo delle efficienze descritto in EN 15316-2-1:2007 e EN 15316-2-3:2007 per considerare il rendimento dei sistemi di emissione e controllo, e di distribuzione. Infine, basandosi sulle curve sperimentali esposte in (De Carli, et al. 2007), è stato considerato il rendimento di produzione. Due livelli di isolamento sono stati considerati per lo stesso tipo di edificio: le caratteristiche dell'edificio sono riportate in Tab. 5.1e in Tab. 5.2.

Superficie riscaldata totale [m ²]	1100
Volume riscaldato [m ³]	3300
Superficie non riscaldata [m ²]	100
Volume non riscaldato [m ³]	300
Rapporto Area finestrata/Superficie netta riscaldata	1/6
Carichi interni	da EN UNI 13790:2008
n [h ⁻¹]	0.5

Tab. 5.1: caratteristiche dell'edificio tipo simulato.

	U_{Wall} [W·m ⁻² K ⁻¹]	$U_{NNheated}$ [W·m ⁻² K ⁻¹]	U_{Window} [W·m ⁻² K ⁻¹]	$U_{GroundFloor}$ [W·m ⁻² K ⁻¹]
Edificio non isolato	1.00	0.65	5.80	0.70
Edificio isolato	0.20	0.27	1.40	0.37

Tab. 5.2: caratteristiche di isolamento degli elementi d'involucro per l'edificio tipo considerato.

La potenza di progetto per ciascuna delle configurazioni adottate è stata valutata mediante simulazioni TRNSYS in condizioni di progetto, ovvero con la temperatura esterna di progetto e senza considerare l'apporto di carichi interni né la radiazione solare. L'edificio è simulato in due differenti climi, ovvero quello di Venezia e quello di Stoccolma, applicati considerando i dati climatici di Energy Plus.

Per quanto riguarda il sistema di controllo dell'impianto, le soluzioni adottate per questo lavoro sono di seguito richiamate. La regolazione più semplice considerata (central supply temperature regulation) avviene in maniera indiretta, ovvero l'utente controlla la temperatura di mandata dell'acqua in funzione della temperatura esterna senza che vi sia in tal modo una correzione determinata dall'effettivo valore della temperatura ambiente, dunque tale sistema costringe l'utente ad agire frequentemente sul sistema di controllo in funzione delle variazioni climatiche esterne. L'altra metodologia considerata ai fini di questo lavoro, è la regolazione proporzionale. In tale sistema, a una variazione della grandezza regolata, ovvero la temperatura dell'aria, corrisponde una variazione proporzionale della grandezza regolante, ovvero la temperatura di mandata del fluido termovettore; la banda proporzionale rappresenta di quanto debba variare la variabile controllata perché l'organo finale di regolazione passi da una posizione (tutto chiuso) a quella opposta (tutto aperto). Si è considerata ai fini di questo lavoro una banda proporzionale di 2 K, adottando la corrispondente efficienza secondo EN UNI 15316-2-1:2007 e riportata, a titolo d'esempio per il caso di radiatori in Fig. 5.2.1. Per una trattazione più dettagliata dei sistemi di regolazione si rimanda a (Haines e Hittle 2003).

Table A.1 — Efficiencies for free heating surfaces (radiators); room heights ≤ 4 m

Influence parameters		Efficiencies		
		η_{str}	η_{ctr}	η_{emb}
Room space temperature regulation	unregulated, with central supply temperature regulation			0,80
	Master room space			0,88
	P-controller (2 K)			0,93
	P-controller (1 K)			0,95
	PI-controller			0,97
	PI-controller (with optimisation function, e.g. presence management, adaptive controller)			0,99
Over-temperature (reference $\theta_r = 20\text{ °C}$)	60 K (e.g. 90/70) 42,5 K (e.g. 70/55) 30 K (e.g. 55/45)	η_{str1}	η_{str2}	
		0,88		
		0,93		
		0,95		
Specific heat losses via external components (GF = glass surface area)	radiator location internal wall		0,87	1
	radiator location external wall			
	- GF without radiation protection		0,83	1
	- GF with radiation protection ^a		0,88	1
	- normal external wall		0,95	1

^a The radiation protection need to prevent 80 % of the radiation losses from the heating body to the glass surface area by means of insulation and/or reflection.

Fig. 5.2.1: efficienze adottate nel caso di radiatori secondo EN UNI 15316-2-1:2007.

Per quanto riguarda la gestione del riscaldamento, sono state considerate le tre differenti strategie di conduzione dell'impianto riassunte in Tab. 5.3. In Tab. 5.4 si riporta la legenda delle sigle che identificano le varie soluzioni implementate nell'analisi.

Modalità di gestione del sistema di riscaldamento	Temperatura di set-point	Tempo di funzionamento dell'impianto	Tempo di spegnimento dell'impianto
Intermittente	21°C	6:00-21:00 da Lunedì a Domenica	0:00-6:00; 21:00-24:00 da Lunedì a Domenica
Continuo	21°C	0:00-24:00, da Lunedì a Domenica	-
Set-Back	21°C (a) – 19°C (b)	(a): 6:00 – 21:00; (b): 0:00 – 6:00 e 21:00-24:00 da Lunedì a Domenica	-

Tab. 5.3: modalità di gestione del sistema di riscaldamento.

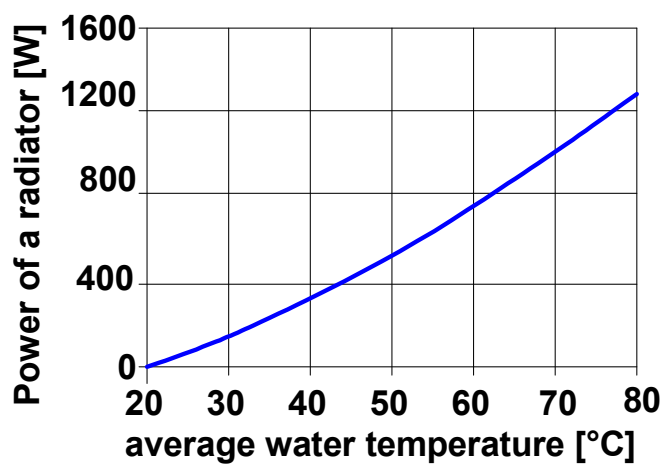
Prima lettera (sistema di regolazione)	U: nessuna regolazione o regolazione centralizzata della temperatura di mandata ; C: sistema di controllo proporzionale (banda proporzionale di 2 K)
Seconda lettera (sistema di emissione)	R: radiatori; F: sistema radiante a secco a pavimento, C: sistema radiante a soffitto; W: sistema radiante a parete
Terza lettera (strategia di riscaldamento)	I: modalità intermittente; C: modalità in continuo, S: set-back
Quarta lettera (sistema di generazione)	T: caldaia tradizionale; C: caldaia a condensazione; H: pompa di calore
Esempio: Caso Base URIT	Sistema di emissione con radiatori senza regolazione (o con central supply regulation); modalità di riscaldamento intermittente e caldaia tradizionale
Esempio: Caso 4 CRSC	Sistema di emissione con radiatori, con regolazione proporzionale (2 K); modalità di riscaldamento set-back e caldaia a condensazione
Esempio: Caso 9 CFSH	Sistema radiante a secco a pavimento con regolazione proporzionale; modalità di riscaldamento set-back e pompa di calore

Tab. 5.4: legenda delle differenti configurazioni considerate nelle analisi.

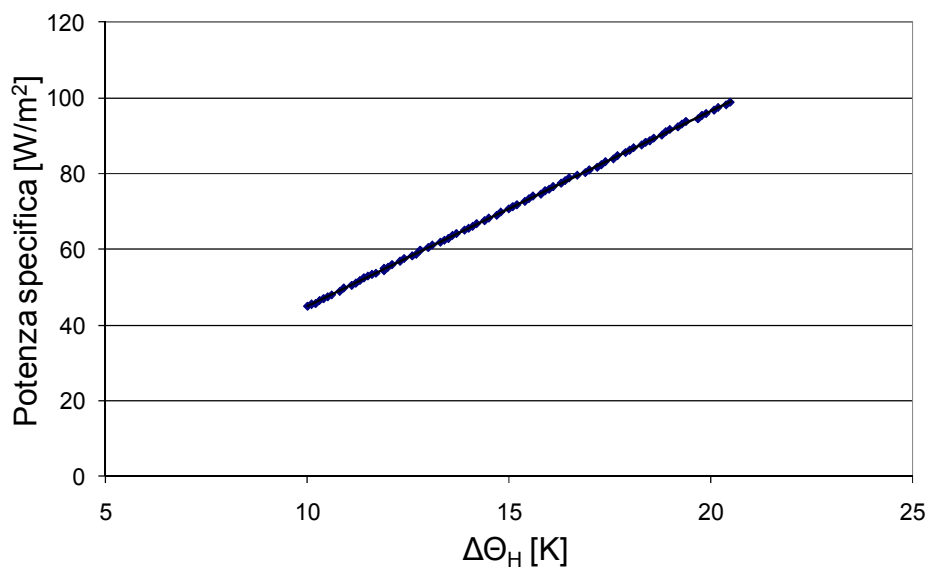
Le seguenti ipotesi in EN 15316-2-1:2007, sono state implementate nelle simulazioni: le temperature di progetto considerate sono $t_{mandata} = 90^{\circ}\text{C}$ e $t_{ritorno} = 70^{\circ}\text{C}$ per le modalità Intermittente e Set-Back, $t_{mandata} = 55^{\circ}\text{C}$ e $t_{ritorno} = 45^{\circ}\text{C}$ per modalità in Continuo. Durante l'analisi è calcolata la temperatura media del sistema, la quale è utilizzata per il calcolo delle perdite termiche. I radiatori sono posizionati in corrispondenza delle pareti esterne.

Per quanto riguarda il sistema di distribuzione, l'approccio seguito in EN 15316-2-3:2007 è di separare il contributo idraulico, che dipende dal tipo di circuito e dal fattore di spesa della pompa di circolazione stessa, che prende in considerazione l'efficienza della pompa in generale. In particolare, per il calcolo della potenza richiesta da quest'ultima si è tenuto conto di fattori di correzione (ad esempio del rendimento ai carichi parziali). Il metodo dettagliato descritto in EN 15316-2-3:2007 è implementato con le indicazioni riportate nell'Annex A della norma stessa. Dunque, per il calcolo della potenza idraulica, la perdita di carico in condizioni di progetto è valutata considerando una caduta di pressione per unità del circuito pari a 100 Pa/m, ed una caduta di pressione aggiuntiva a seconda dei componenti, perciò le variabili per determinare questa perdita di carico sono solo la lunghezza massima del circuito e le cadute di pressione dei sistemi di emissione e generazione (i cui valori sono tabulati). Altri fattori di correzione sono dati ad esempio per tenere conto del tipo di rete idraulica. Il fattore di spesa della pompa, invece, è calcolato con riferimento alle costanti che caratterizzano il controllo della pompa, al fattore di carico medio del circuito di distribuzione, e ad un fattore che dipende dalla potenza idraulica in condizioni di progetto.

Attraverso l'analisi è stimato il carico orario richiesto dal sistema di generazione, dunque sono ricavati l'efficienza del sistema di generazione o il COP della pompa attraverso curve sperimentali; inoltre, è valutata anche la temperatura media del sistema di emissione (radiatori o pannelli radianti). Per quanto riguarda le pompe di calore acqua/acqua, è stata assunta una temperatura di sorgente fredda costante e pari a 13°C per il clima di Venezia, e ad 8°C per quello di Stoccolma. Infine, si ricava il fabbisogno di energia primaria a partire dal fabbisogno di calore per il riscaldamento e di energia elettrica per gli ausiliari. Le curve di resa dei terminali di impianto utilizzate per l'analisi sono mutate da (De Carli, et al. 2007), e riportate in Fig. 5.2.2 per radiatori e sistema a pavimento; in Fig. 5.2.3 si riportano le curve utilizzate per il rendimento dei sistemi di generazione in funzione del fattore di carico (il caso (B) si riferisce a caldaia a condensazione in funzionamento intermittente, il caso (C) a caldaia modulante). Infine, in Fig. 5.2.4 sono riportate le curve di COP per grandi unità e piccole unità domestiche utilizzate per le simulazioni.

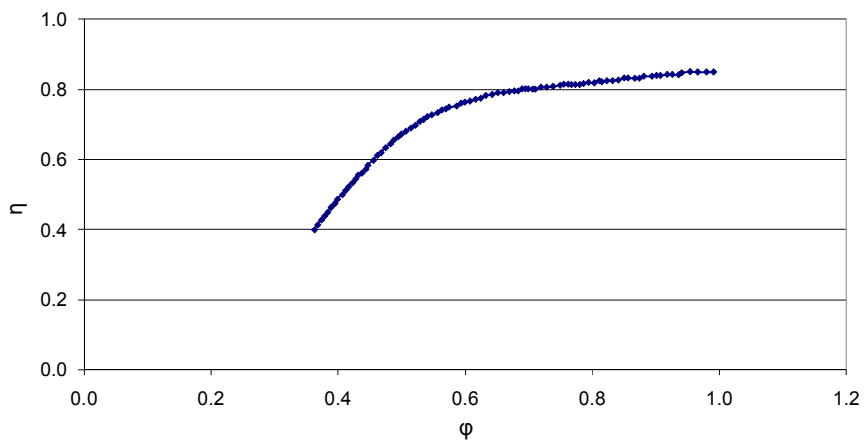


(A)

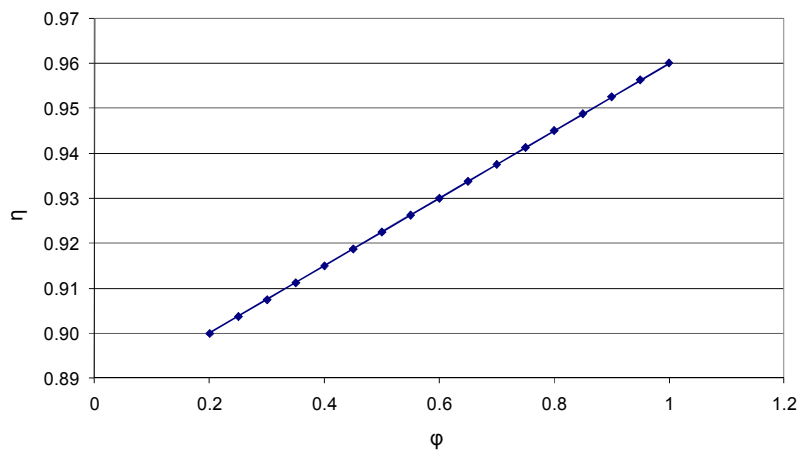


(B)

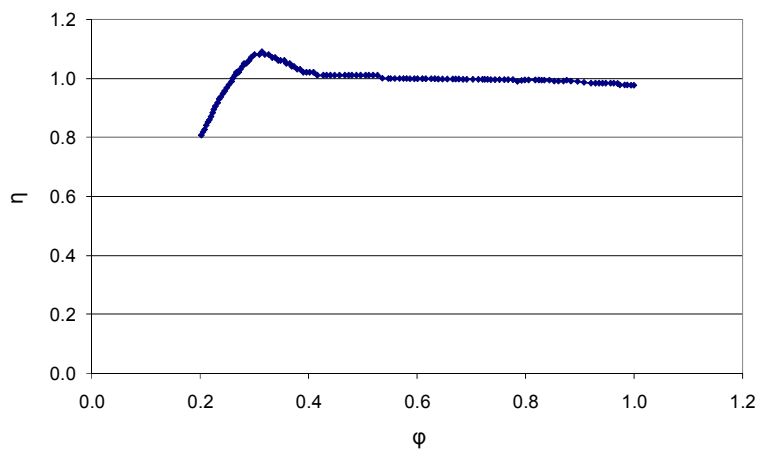
Fig. 5.2.2: curve di potenza dei terminali di impianto: (A) curva di un radiatore, (B) curva di un sistema radiante a pavimento. Fonte: (De Carli, et al. 2007). $\Delta\Theta_H$ [K]: salto termico medio tra le temperature dell'aria e dell'acqua secondo EN 1264-1:1999.



(A)



(B)



(C)

Fig. 5.2.3: curve di rendimento dei sistemi di generazione utilizzate per l'analisi: (A) curva di rendimento di caldaia tradizionale, (B) curva di rendimento di caldaia a condensazione in funzionamento ad alta temperatura, (C) curva di rendimento di una caldaia a condensazione modulante, fonte (De Carli, et al. 2007).

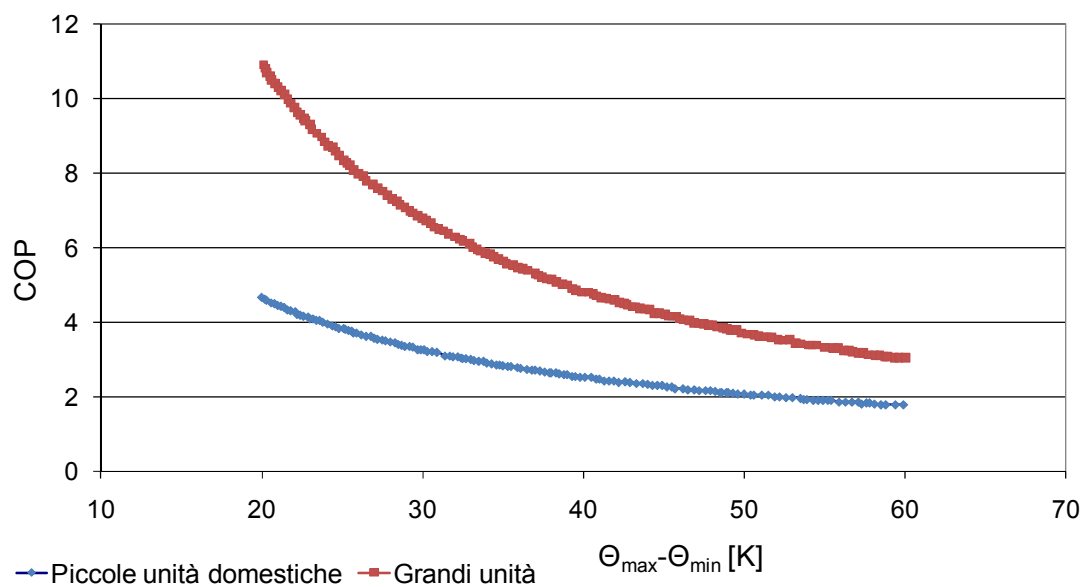


Fig. 5.2.4: curve di COP relative a piccole unità domestiche e grandi unità utilizzate per l'analisi, fonte: (De Carli, et al. 2007).

5.3 Risultati dell'analisi

Nelle Tab. 5.5, Tab. 5.6, Tab. 5.7, Tab. 5.8 si riportano i risultati delle analisi. SPE è il fabbisogno specifico di energia primaria (Specific Primary Energy demand); per ogni caso è mostrata anche la percentuale di variazione del fabbisogno di SPE in riferimento alla SPE del Caso Base. Inoltre si riportano anche le potenze di progetto e le variazioni percentuali rispetto al Caso Base.

Venezia – Edificio non termicamente isolato										
	<i>CB</i> <i>URIT</i>	<i>1</i> <i>CRIT</i>	<i>2</i> <i>CRIC</i>	<i>3</i> <i>CRCC</i>	<i>4</i> <i>CRSC</i>	<i>5</i> <i>CRSH</i>	<i>6</i> <i>UFSC</i>	<i>7</i> <i>CFSC</i>	<i>8</i> <i>UFSH</i>	<i>9</i> <i>CFSH</i>
<i>SPE</i> <i>[kWh·m⁻²·y⁻¹]</i>	183	172	117	128	119	133	125	105	92	73
<i>% Var. rif. CB</i>	-	-6%	-36%	-30%	-35%	-27%	-32%	-42%	-50%	-60%
<i>Potenza di progetto [kW]</i>	132	132	132	70	85	85	85	85	85	85
<i>Var PP rif CB</i>	-	0%	0%	-47%	-35%	-35%	-35%	-35%	-35%	-35%
	<i>10</i> <i>UCSC</i>	<i>11</i> <i>CCSC</i>	<i>12</i> <i>UCSH</i>	<i>13</i> <i>CCSH</i>	<i>14</i> <i>UWSC</i>	<i>15</i> <i>CWSC</i>	<i>16</i> <i>UWSH</i>	<i>17 CWSH</i>		-
<i>SPE</i> <i>[kWh·m⁻²·y⁻¹]</i>	132	113	96	78	130	111	105	84		-
<i>% Var. rif. CB</i>	-28%	-38%	-48%	-62%	-29%	-39%	-43%	-54%		-
<i>Potenza di progetto [kW]</i>	85	85	85	85	85	85	85	85		-
<i>Var PP rif CB</i>	-35%	-35%	-35%	-35%	-35%	-35%	-35%	-35%		-

PP:potenza di progetto, CB: Caso Base

Tab. 5.5: risultati delle analisi per il caso di edifici non isolati nel clima di Venezia.

Venezia – Edificio termicamente isolato										
	<i>BC</i> <i>URIT</i>	<i>1</i> <i>CRIT</i>	<i>2</i> <i>CRIC</i>	<i>3</i> <i>CRCC</i>	<i>4</i> <i>CRSC</i>	<i>5</i> <i>CRSH</i>	<i>6</i> <i>UFSC</i>	<i>7</i> <i>CFSC</i>	<i>8</i> <i>UFSH</i>	<i>9</i> <i>CFSH</i>
<i>SPE</i> [kWh·m ⁻² ·y ⁻¹]	44	41	27	29	28	34	24	20	15	12
% Var rif. CB	-	-7%	-37%	-34%	-36%	-21%	-45%	-53%	-66%	-72%
Potenza di progetto [kW]	70	70	70	35	50	50	50	50	50	50
Var PP rif CB	-	0%	0%	-50%	-29%	-29%	-29%	-29%	-29%	-29%
	<i>10</i> <i>UCSC</i>	<i>11</i> <i>CCSC</i>	<i>12</i> <i>UCSH</i>	<i>13</i> <i>CCSH</i>	<i>14</i> <i>UWSC</i>	<i>15</i> <i>CWSC</i>	<i>16</i> <i>UWSH</i>	<i>17 CWSH</i>		-
<i>SPE</i> [kWh·m ⁻² ·y ⁻¹]	26	22	15	13	25	22	17	14		-
% Var rif. CB	-41%	-49%	-65%	-70%	-42%	-49%	-62%	-68%		-
Potenza di progetto [kW]	50	50	50	50	50	50	50	50		-
Var PP rif CB	-29%	-29%	-29%	-29%	-29%	-29%	-29%	-29%		-

PP:potenza di progetto, CB: Caso Base, Var: variazione

Tab. 5.6: risultati delle analisi per il caso di edifici termicamente isolati nel clima di Venezia.

Stoccolma – Edificio non termicamente isolato										
	<i>BC</i> <i>URIT</i>	<i>1</i> <i>CRIT</i>	<i>2</i> <i>CRIC</i>	<i>3</i> <i>CRCC</i>	<i>4</i> <i>CRSC</i>	<i>5</i> <i>CRSH</i>	<i>6</i> <i>UFSC</i>	<i>7</i> <i>CFSC</i>	<i>8</i> <i>UFSH</i>	<i>9</i> <i>CFSH</i>
<i>SPE</i> [kWh·m ⁻² ·y ⁻¹]	376	358	252	266	253	316	273	231	261	208
% Var rif. CB	-	-5%	-33%	-29%	-33%	-16%	-27%	-39%	-31%	-45%
Potenza di progetto [kW]	180	180	180	96	111	111	111	111	111	111
Var PP rif CB	-	0%	0%	-47%	-38%	-38%	-38%	-38%	-38%	-38%
	<i>10</i> <i>UCSC</i>	<i>11</i> <i>CCSC</i>	<i>12</i> <i>UCSH</i>	<i>13</i> <i>CCSH</i>	<i>14</i> <i>UWSC</i>	<i>15</i> <i>CWSC</i>	<i>16</i> <i>UWSH</i>	<i>17 CWSH</i>		-
<i>SPE</i> [kWh·m ⁻² ·y ⁻¹]	291	248	272	221	286	244	298	239		-
% Var rif. CB	-23%	-34%	-28%	-41%	-24%	-35%	-21%	-36%		-
Potenza di progetto [kW]	111	111	111	111	111	111	111	111		-
Var PP rif CB	-38%	-38%	-38%	-38%	-38%	-38%	-38%	-38%		-

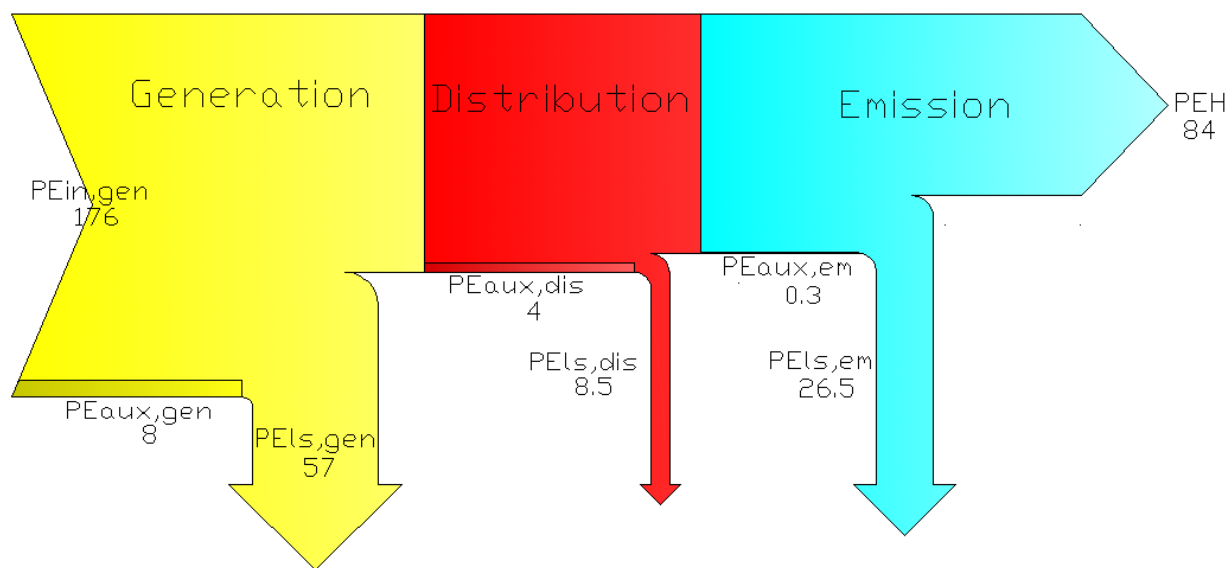
PP:potenza di progetto, CB: Caso Base, Var: variazione

Tab. 5.7: risultati delle analisi per il caso di edifici non isolati nel clima di Stoccolma.

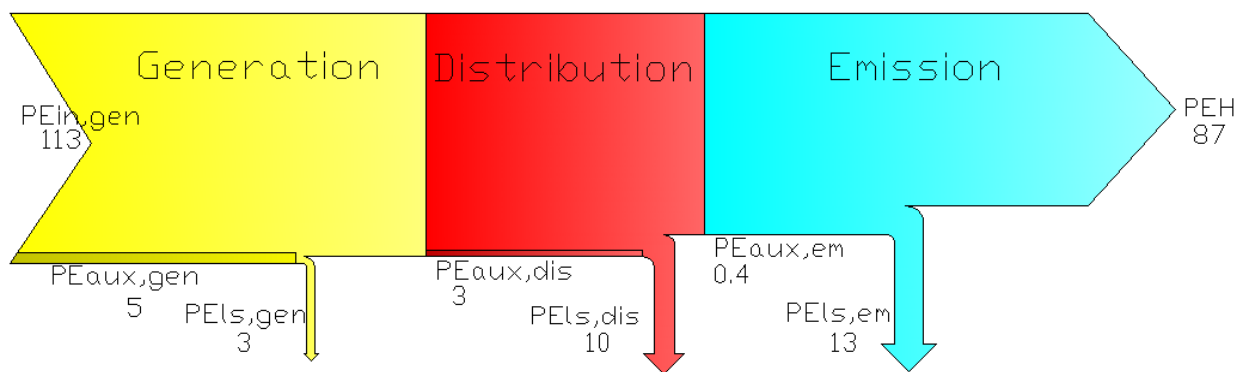
Stoccolma – Edificio termicamente isolato										
	<i>BC URIT</i>	<i>1 CRIT</i>	<i>2 CRIC</i>	<i>3 CRCC</i>	<i>4 CRSC</i>	<i>5 CRSH</i>	<i>6 UFSC</i>	<i>7 CFSC</i>	<i>8 UFSH</i>	<i>9 CFSH</i>
<i>SPE [kWh·m⁻²·y⁻¹]</i>	127	119	79	79	76	96	77	65	59	48
<i>% Var rif. CB</i>	-	-7%	-38%	-38%	-40%	-25%	-40%	-49%	-54%	-62%
<i>Potenza di progetto [kW]</i>	95	95	95	45	62	62	62	62	62	62
<i>Var PP rif CB</i>	-	0%	0%	-53%	-35%	-35%	-35%	-35%	-35%	-35%
	<i>10 UCSC</i>	<i>11 CCSC</i>	<i>12 UCSH</i>	<i>13 CCSH</i>	<i>14 UWSC</i>	<i>15 CWSC</i>	<i>16 UWSH</i>	<i>17 CWSH</i>		-
<i>SPE [kWh·m⁻²·y⁻¹]</i>	82	71	61	51	83	71	69	56		-
<i>% Var rif. CB</i>	-36%	-45%	-52%	-60%	-35%	-45%	-46%	-56%		-
<i>Potenza di progetto [kW]</i>	62	62	62	62	62	62	62	62		-
<i>Var PP rif CB</i>	-35%	-35%	-35%	-35%	-35%	-35%	-35%	-35%		-
PP:potenza di progetto, CB: Caso Base, Var: variazione										

Tab. 5.8: risultati delle analisi per il caso di edifici termicamente isolati nel clima di Stoccolma.

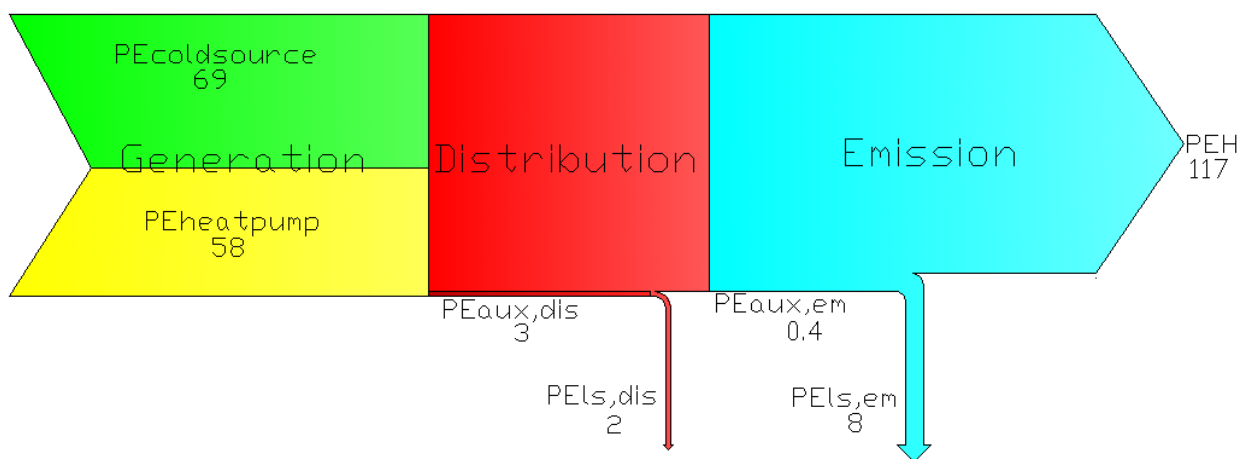
In Fig. 5.3.1 e Fig. 5.3.2 si riportano i diagrammi riferiti all'analisi energetica ed exergetica di alcune delle soluzioni prese in considerazione.



(A)



(B)



(C)

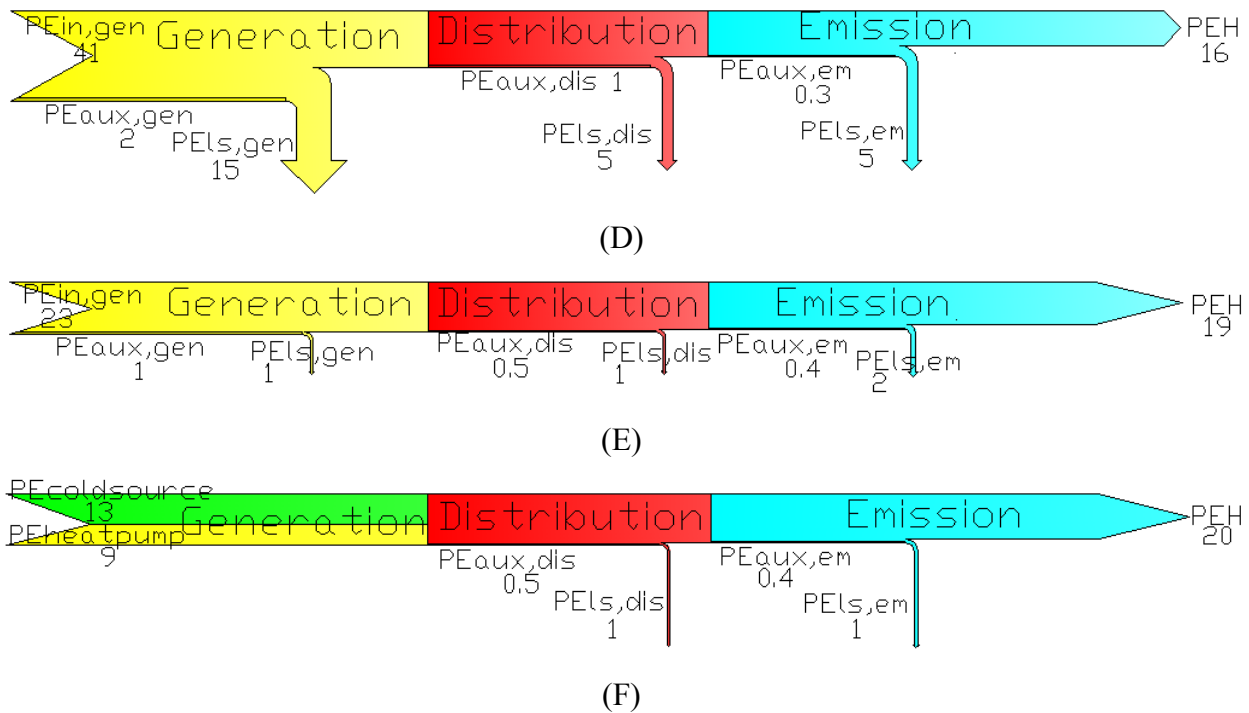
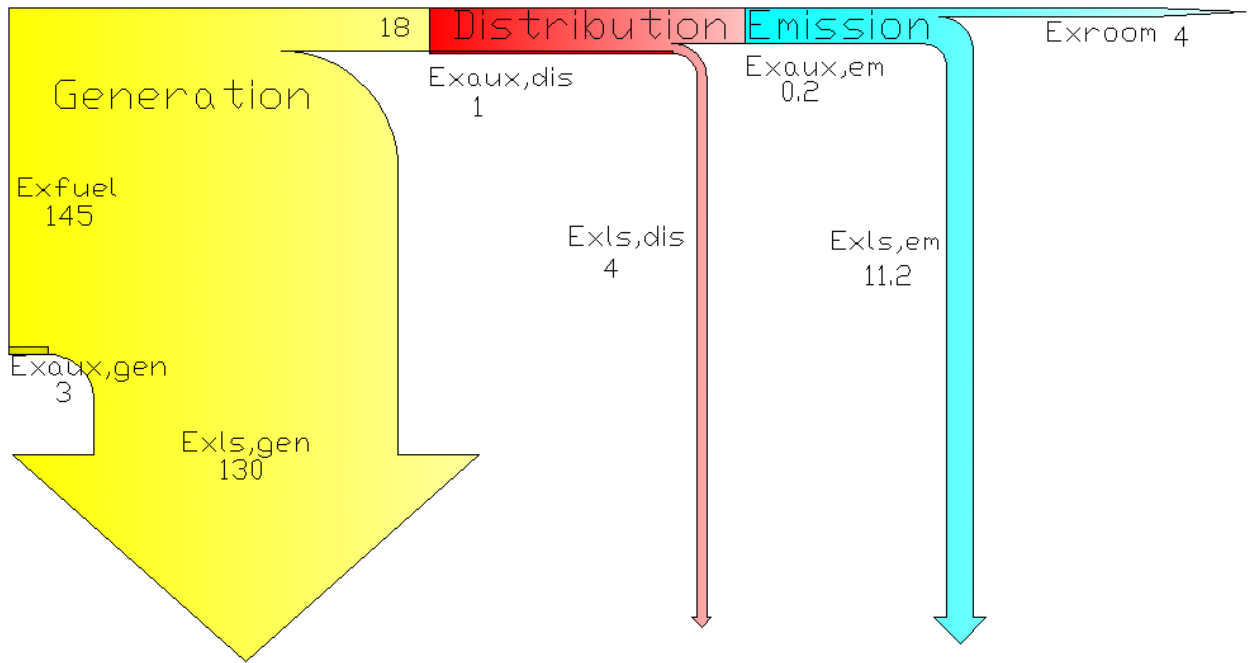
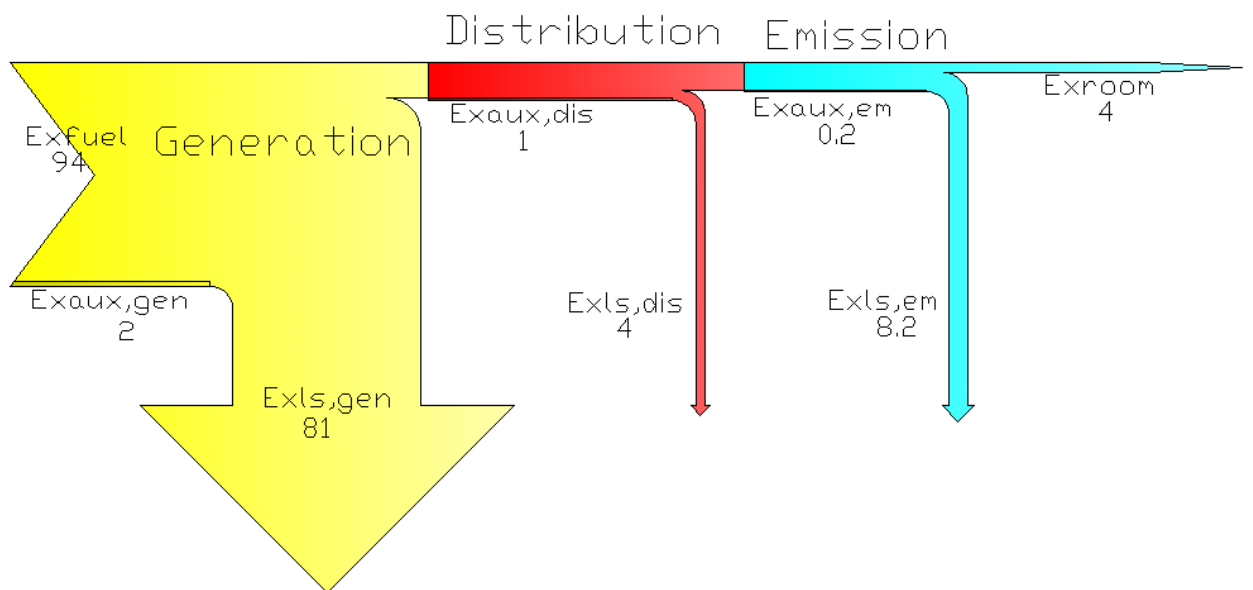


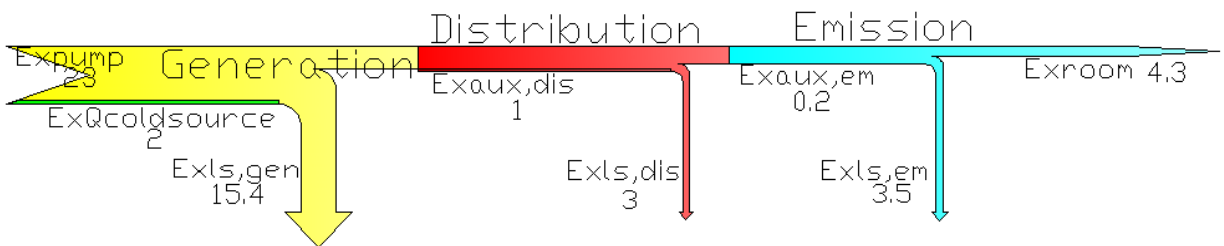
Fig. 5.3.1: Diagrammi dell’Energia Primaria (clima di Venezia) per: (A) Caso Base – sistema di emissione con radiatori, regolazione centralizzata della temperatura di mandata, modalità intermittente, caldaia tradizionale - edificio non isolato; (B) Caso 4 – Sistema di emissione a radiatori con regolazione proporzionale, modalità set-back, caldaia a condensazione - edificio non isolato; (C) Caso 9 – sistema di riscaldamento radiante a pavimento a secco con regolazione proporzionale, modalità set-back, pompa di calore - edificio non isolato; (D) Caso Base – sistema di emissione con radiatori, regolazione centralizzata della temperatura di mandata, modalità intermittente, caldaia tradizionale - edificio isolato; (E) Caso 4 – Sistema di emissione a radiatori con regolazione proporzionale, modalità set-back, caldaia a condensazione - edificio isolato; (F) Caso 9 – sistema di riscaldamento radiante a pavimento a secco con regolazione proporzionale, modalità set-back, pompa di calore - edificio isolato. L’ammontare dei flussi è riportato in $[kWh \cdot m^{-2}]$.



(A)



(B)



(C)

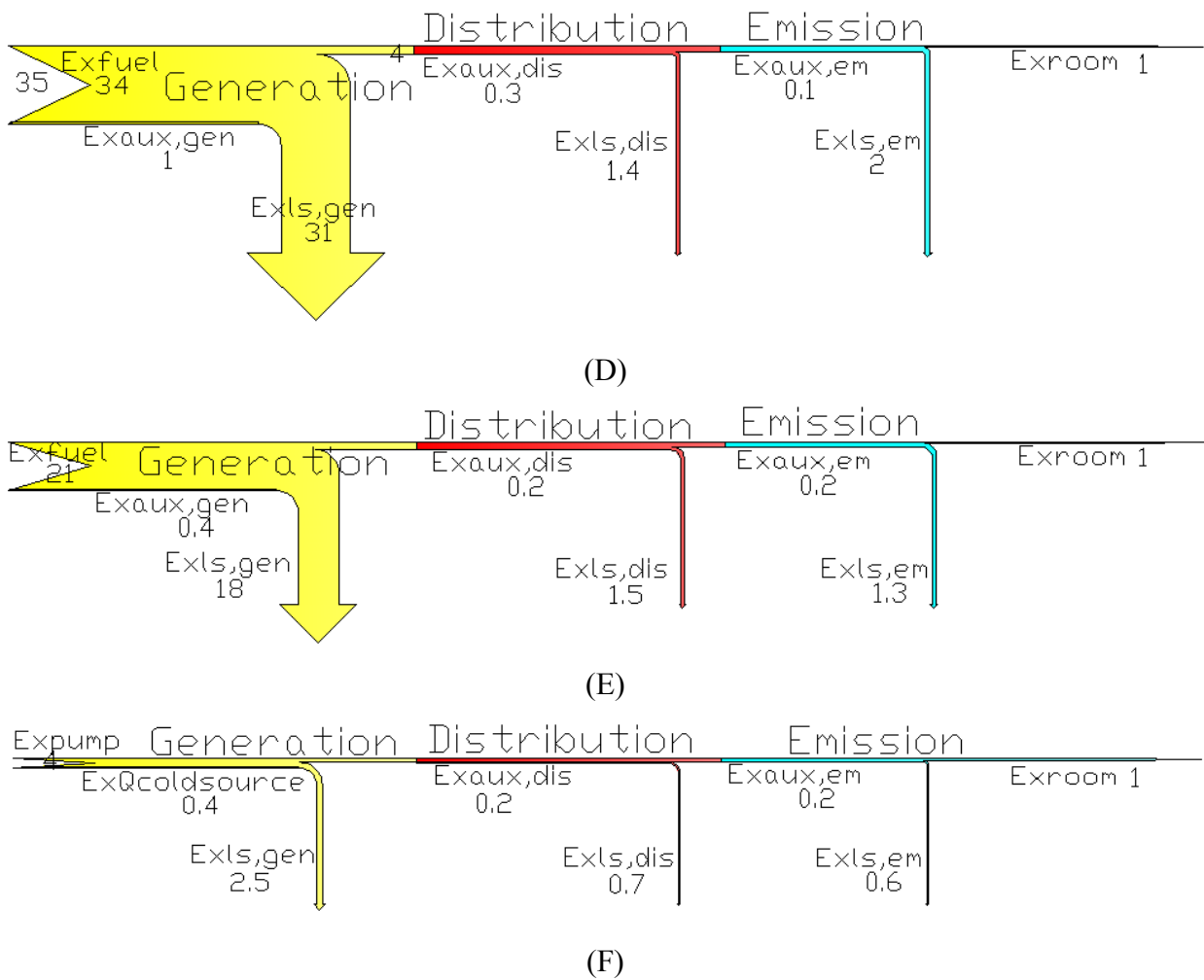


Fig. 5.3.2: Diagrammi dell'Exergia (clima di Venezia) per: (A) Caso Base – sistema di emissione con radiatori, regolazione centralizzata della temperatura di mandata, modalità intermittente, caldaia tradizionale - edificio non isolato; (B) Caso 4 – Sistema di emissione a radiatori con regolazione proporzionale, modalità set-back, caldaia a condensazione - edificio non isolato; (C) Caso 9 – sistema di riscaldamento radiante a pavimento a secco con regolazione proporzionale, modalità set-back, pompa di calore - edificio non isolato; (D) Caso Base – sistema di emissione con radiatori, regolazione centralizzata della temperatura di mandata, modalità intermittente, caldaia tradizionale - edificio isolato; (E) Caso 4 – Sistema di emissione a radiatori con regolazione proporzionale, modalità set-back, caldaia a condensazione - edificio isolato; (F) Caso 9 – sistema di riscaldamento radiante a pavimento a secco con regolazione proporzionale, modalità set-back, pompa di calore - edificio isolato. L'ammontare dei flussi è riportato in [kWh·m⁻²].

5.4 Discussione dei risultati

Dall'analisi dei risultati esposti in 5.3 si possono evincere alcune considerazioni. Per edifici non isolati termicamente, e con riferimento al fabbisogno di energia primaria specifica per la climatizzazione invernale del Caso Base CB dell'edificio non isolato (sistema di emissione con radiatori, regolazione centralizzata della temperatura di mandata, caldaia tradizionale con funzionamento intermittente), l'introduzione del sistema di regolazione proporzionale porta ad un risparmio energetico del 5-6% nei due climi. Tale risparmio raggiunge valori compresi tra il 33-35% per i due climi se il sistema di controllo è associato ad un sistema di generazione a caldaia a condensazione modulante, con strategia set-back, mediante la quale è garantito un maggior livello di comfort. La sostituzione del vecchio sistema di generazione con uno a pompa di calore ma lasciando i radiatori (ovvero la sola modifica del sistema di generazione) accoppiata con una strategia di riscaldamento set-back porterebbe ad un risparmio in termini di energia primaria rispettivamente del 27% e 16% per Venezia e Stoccolma, ma questa non sembra rappresentare la soluzione migliore. Queste considerazioni possono essere rilevanti, ad esempio, per la riqualificazione di edifici storici per i quali garantire un maggior livello di isolamento non è sempre possibile; questo studio evidenzia come in questo caso la sostituzione di un sistema di generazione tradizionale con una tecnologia moderna di caldaia a condensazione modulante accoppiata ad un'opportuna strategia di gestione (che offra alla caldaia stessa la possibilità di lavorare nel suo miglior campo di funzionamento) possa rappresentare comunque un'ottima soluzione, pur mantenendo lo stesso sistema di emissione e garantendo livelli adeguati di comfort. Se vi fosse inoltre la possibilità di installare un sistema radiante, considerato sempre in modalità continua o set-back, si nota come si riescano ad ottenere ottimi risparmi; la soluzione migliore è rappresentata dai casi di sistema radiante a pavimento, a soffitto o a parete con regolazione proporzionale, pompa di calore e strategia set-back, che offrono risparmi rispettivamente del 60%, 58% e 54% per il clima di Venezia, e del 45%, 41% e 36% per il clima di Stoccolma. Riguardo il sistema di controllo per il sistema radiante, questo comporta una riduzione tra il 15%-20% di fabbisogno di energia primaria rispetto alla stessa soluzione non regolata.

Per quanto riguarda gli edifici nuovi o sottoposti a coibentazione dell'involucro, si vede come il sistema più efficiente da installare sia quello radiante a pavimento, soffitto o parete con pompa di calore gestito in modalità set-back e con sistema di regolazione proporzionale, che offrono

fabbisogni specifici compresi tra 12-15 kWh·m⁻² nel clima di Venezia, e tra 48-56 kWh·m⁻² per il clima di Stoccolma, con risparmi tra 68%-72% e tra 56-62% riferiti al Caso Base dell'edificio isolato (ad esempio per riqualificazioni energetiche di involucro e di impianto) rispettivamente per i due climi. Nel caso in cui gli edifici in questione siano nuovi, e dunque si debba scegliere il miglior sistema da accoppiarvi, si può considerare il confronto tra i casi succitati di sistema radiante con pompa di calore in modalità set-back e con sistema di controllo e regolazione, con il caso CRSC, ovvero radiatori con caldaia a condensazione, strategia set-back e sistema di regolazione, che comporterebbe riduzioni relative comprese tra il 50-57% e 26%-37% rispettivamente per i climi di Venezia e Stoccolma. Tuttavia per edifici termicamente isolati, anche sistemi radianti accoppiati a pompa di calore e strategia set-back ma senza una buona regolazione, possono offrire significativi risparmi con fabbisogni specifici tra 15-17 kWh·m⁻² (aumento relativo tra 15%-25% rispetto alla stessa soluzione con regolazione) per Venezia, e tra 59-69 kWh·m⁻² (aumento relativo tra 20%-23% rispetto alla stessa soluzione con regolazione) per Stoccolma. Inoltre nelle Tab. 5.5, Tab. 5.6, Tab. 5.7 e Tab. 5.8 si mostra la possibilità di ridurre la potenza di progetto variando la strategia di riscaldamento (ad esempio vi è una riduzione relativa del 35% sulla potenza installata per il caso di Venezia, edifici non isolati). Per ulteriori confronti si faccia riferimento alle Tab. 5.5-Tab. 5.8.

Per quanto riguarda i diagrammi per l'energia primaria e per l'exergia, le soluzioni analizzate sono state relative al Caso Base, al Caso 4 ed al Caso 9 del clima di Venezia. In tal modo si sono considerate le tre differenti tecnologie adottate nelle analisi, ovvero la caldaia tradizionale, a condensazione e la pompa di calore, inoltre sono discussi anche alcuni aspetti riguardo il sistema di controllo e regolazione. Infine è considerato anche il punto di vista exergetico. Ad esempio con riferimento al caso di edifici non isolati termicamente, l'efficienza energetica per il Caso Base risulta del 46% circa e del 74% per il caso con caldaia a condensazione; il caso di pompa di calore porta ad avere un COP medio stagionale pari a circa 2. Per quanto riguarda l'analisi exergetica, per il Caso Base l'efficienza è di circa il 2.5%, per il Caso 4 è di circa il 4% e per il Caso 9 è di circa il 18%. Per una valutazione più dettagliata, in particolare delle perdite di ciascun sistema, si rimanda ai diagrammi, particolarmente immediati, di Fig. 5.3.1 e Fig. 5.3.2.

5.5 Reti di teleriscaldamento

Per quanto riguarda il caso di reti di teleriscaldamento, si sono considerate composizioni degli edifici descritti precedentemente (vecchi edifici non isolati e edifici nuovi o che sono stati sottoposti a riqualificazione energetica); le dimensioni sono assunte pari a 1 Mm³ che corrispondono a 278 edifici. In Tab. 5.9 è riportata la legenda delle configurazioni analizzate. Per ognuno dei casi analizzati si è variato il sistema di generazione: caldaia tradizionale (organizzato in maniera tale da ottenere un alto fattore di carico), caldaie a condensazione modulanti (che lavorano con efficienze ottimizzate) e pompe di calore (operanti alla temperatura media richiesta dal sistema di emissione). Lo studio è effettuato in entrambi i climi di Venezia e Stoccolma. Nelle Tab. 5.10 e Tab. 5.11 sono riportati i risultati dell'analisi.

Prima lettera (sistema di emissione)	<i>R</i> : radiatori; <i>F</i> : sistema radiante a pavimento a secco; <i>C</i> : sistema a soffitto; <i>W</i> : sistema radiante a parete
Primo numero (sistema di controllo e regolazione)	<i>1</i> : Vecchi edifici senza sistema di regolazione – Edifici moderni con sistema di regolazione; <i>2</i> : Vecchi edifici con sistema di regolazione – Edifici moderni con sistema di regolazione
Seconda lettera (strategia di riscaldamento)	<i>I</i> : modalità intermittente; <i>S</i> : modalità set back
Secondo numero (composizione degli edifici)	<i>1</i> : 90% Vecchi edifici, 10% Edifici moderni, <i>2</i> : 50% Vecchi edifici, 50% Edifici moderni, <i>3</i> : 10% Vecchi edifici, 90% Edifici moderni
Esempio: R1I1	Rete per 90% Vecchi edifici senza sistema di regolazione, 10% Edifici moderni con sistema di regolazione, sistema di emissione a radiatori e modalità di riscaldamento intermittente
Esempio: F2S2	Rete per 50% Vecchi edifici con sistema di controllo, 50% Edifici moderni con sistema di regolazione, sistema di emissione a pavimento a secco, modalità di riscaldamento set back
Esempio: C1S3	Rete per 10% Vecchi edifici senza sistema di regolazione, 90% Edifici moderni senza sistema di regolazione, sistema radiante a soffitto, modalità di riscaldamento set back

Tab. 5.9: legenda delle configurazioni usate nell'analisi per il riscaldamento distrettuale

Venezia – Radiatori	R1I1	R1I2	R1I3	R1S1	R1S2	R1S3
SPE sistema tradizionale [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	142	91	41	131	87	43
% Var rispetto al caso di rif. RI tradizionale	-	-	-	-7%	-5%	+5%
SPE caldaie a cond. modulanti [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	138	89	40	116	77	38
% Var rispetto al sistema tradizionale	-2%	-2%	-2%	-11%	-11%	-11%
% Var rispetto al caso di rif. RI caldaie cond.	-	-	-	-16%	-14%	-5%
SPE pompe di calore [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	136	77	18	93	54	14
COP medio sulla stagione di riscaldamento	2.5	2.5	2.5	3.5	3.5	3.5
% Var rispetto il caso di rif. RI pompa di calore	-	-	-	-32%	-30%	-23%
% Var rispetto al sistema tradizionale	-4%	-16%	-55%	-29%	-38%	-67%
Venezia – Sistema a pavimento	F1S1	F1S2	F1S3	F2S1	F2S2	F2S3
SPE sistema tradizionale [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	142	90	38	120	78	35
SPE caldaie a cond. modulanti [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	126	80	34	106	69	31
% Var rispetto al sistema tradizionale	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%
SPE pompa di calore [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	60	35	10	50	25	9
COP medio sulla stagione di riscaldamento	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1
% Var rispetto al sistema tradizionale	-58%	-61%	-74%	-58%	-68%	-75%
Venezia – Sistema a soffitto	C1S1	C1S2	C1S3	C2S1	C2S2	C2S3
SPE sistema tradizionale [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	151	96	41	129	84	38
SPE caldaie a cond. modulanti [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	134	85	36	114	74	34
% Var rispetto al sistema tradizionale	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%
SPE pompa di calore [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	64	37	11	54	32	10
COP medio sulla stagione di riscaldamento	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1
% Var rispetto al sistema tradizionale	-58%	-61%	-74%	-58%	-62%	-75%
Venezia – Sistema a parete	W1S1	W1S2	W1S3	W2S1	W2S2	W2S3
SPE sistema tradizionale [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	148	94	40	126	82	38
SPE caldaie a cond. modulanti [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	132	84	36	112	73	34
% Var rispetto al sistema tradizionale	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%
SPE pompa di calore [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	63	37	11	53	31	10
COP medio sulla stagione di riscaldamento	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1
% Var rispetto al sistema tradizionale	-58%	-61%	-74%	-58%	-62%	-75%

Tab. 5.10: risultati dell'analisi per il caso di Venezia.

Stoccolma – Radiatori	R1I1	R1I2	R1I3	R1S1	R1S2	R1S3
SPE sistema tradizionale [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	307	209	112	287	200	112
% Var rispetto al caso di rif. RI tradizionale	-	-	-	-6%	-4%	0%
SPE caldaia a condensazione [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	300	205	109	254	177	99
% Var rispetto al sistema tradizionale	-2%	-2%	-2%	-11%	-11%	-11%
% Var rispetto al caso di rif. RI caldaie cond.	-	-	-	-15%	-13%	-9%
SPE pompa di calore [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	355	202	49	270	155	40
COP medio sulla stagione di riscaldamento	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5	2.5
% Var rispetto il caso di rif. RI pompa di calore	-	-	-	-24%	-23%	-18%
% Var rispetto al sistema tradizionale	+16%	-4%	-56%	-6%	-22%	-64%
Stoccolma – Sistema a pavimento	F1S1	F1S2	F1S3	F2S1	F2S2	F2S3
SPE sistema tradizionale [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	316	211	107	268	185	101
SPE caldaia a condensazione [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	280	187	94	237	163	90
% Var rispetto al sistema tradizionale	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%
SPE pompa di calore [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	175	102	28	148	86	25
COP medio sulla stagione di riscaldamento	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
% Var rispetto al sistema tradizionale	-45%	-52%	-73%	-45%	-53%	-75%
Stoccolma – Sistema a soffitto	C1S1	C1S2	C1S3	C2S1	C2S2	C2S3
SPE sistema tradizionale [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	337	226	115	289	199	110
SPE caldaia a condensazione [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	298	200	102	256	176	97
% Var rispetto al sistema tradizionale	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%
SPE pompa di calore [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	183	107	30	157	92	27
COP medio sulla stagione di riscaldamento	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
% Var rispetto al sistema tradizionale	-45%	-53%	-74%	-46%	-54%	-75%
Stoccolma – Sistema a parete	W1S1	W1S2	W1S3	W2S1	W2S2	W2S3
SPE sistema tradizionale [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	332	223	114	283	196	109
SPE caldaia a condensazione [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	294	198	101	251	174	97
% Var rispetto al sistema tradizionale	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%
SPE pompa di calore [kWh·m ⁻² y ⁻¹]	181	106	31	154	91	28
COP medio sulla stagione di riscaldamento	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
% Var rispetto al sistema tradizionale	-45%	-53%	-73%	-46%	-54%	-75%

Tab. 5.11: risultati dell'analisi per il caso di Stoccolma.

5.6 Discussione dei risultati per reti di teleriscaldamento

Il confronto in Sez. 5.5 è stato fatto variando il sistema di produzione dell'energia termica per alcune soluzioni di riscaldamento distrettuale. Con riferimento alle Tab. 5.10 e Tab. 5.11, si nota come nel caso di sistema di emissione a radiatori il cambio di strategia da intermittente a set-back comporta una diminuzione relativa della SPE tra soluzioni dello stesso tipo (es. R1I1 ed R1S1 con lo stesso sistema di conversione) tra 4%-7% per sistema tradizionale, tra 13-16% per caldaia a condensazione e tra 18%-32% nel caso di pompa di calore per i due climi considerati. La caldaia a condensazione modulante in questo caso garantirebbe un risparmio dell'11% nel fabbisogno di energia primaria se utilizzata in condizioni ottimali (che permettano la condensazione), ovvero in modalità set-back. La migliore soluzione è, nel caso di reti costituite in maggioranza da vecchi edifici, o da equilibrio tra edifici vecchi e nuovi, con sistema di emissione a radiatori, la combinazione di pompa di calore con strategia set-back per entrambi i climi con l'eccezione della soluzione R1S1 di Stoccolma per la quale risulta più energeticamente efficiente la caldaia a condensazione. Ad esempio il risparmio di energia rispetto al caso tradizionale con strategia intermittente che raggiunge la soluzione con pompa di calore è del 35% per il clima di Venezia (tra R1I1 pompa di calore e R1S1 caldaia tradizionale). Sebbene per il riscaldamento distrettuale si siano considerati edifici vecchi e nuovi all'interno dello stesso distretto, nel caso di Stoccolma la soluzione R1S1 con caldaia a condensazione garantisce all'incirca lo stesso fabbisogno dell'edificio singolo CRSC (254 kWh·m⁻² e 253 kWh·m⁻² rispettivamente), mentre nel caso di Venezia l'utilizzo di grosse pompe di calore permette una diminuzione del fabbisogno specifico (che è nel caso di CRSC pari a 119 kWh·m⁻² e scende a 93 kWh·m⁻² per R1S1 e pompa di calore con diminuzione relativa pari al 22%).

Per quanto riguarda i sistemi radianti, l'utilizzo delle pompe di calore di grossa taglia risulta la soluzione migliore per entrambi i climi: sebbene si siano considerati distretti costituiti da edifici vecchi e nuovi, sia nel caso di Venezia che di Stoccolma si registra una diminuzione del fabbisogno specifico rispetto a singolo edificio (Sez. 5.3). Per il clima di Venezia, infatti, si raggiunge il minimo di 50 kWh·m⁻² per la combinazione F2S1 e pompa di calore, dunque 90% di edifici vecchi, sistema radiante e presenza della regolazione proporzionale, da confrontare con 73 kWh·m⁻² del caso CFSH (ovvero una diminuzione relativa di circa il 30%). Per edifici in larga maggioranza nuovi, sistema radiante e presenza della regolazione proporzionale, con pompa di calore e strategia set-back, ovvero soluzione F2S3, si raggiunge il valore minimo di 9 kWh·m⁻²,

da confrontare con i $12 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ del caso CFSH (dunque una diminuzione relativa di circa il 25%). Per il clima di Stoccolma si raggiunge il minimo di $148 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ per la combinazione F2S1 e pompa di calore, dunque edifici vecchi in maggioranza, sistema radiante e presenza della regolazione proporzionale e strategia set-back, da confrontare con $208 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ del caso CFSH (ovvero una diminuzione relativa di circa il 30%); per edifici in larga maggioranza nuovi, sistema radiante e presenza della regolazione, con pompa di calore, ovvero soluzione F2S3, si raggiunge il valore minimo di $25 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, da confrontare con i $48 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ del caso CFSH (dunque una diminuzione relativa di circa il 50%). Per i sistemi radianti, la presenza di un sistema di controllo e regolazione porta ad una diminuzione relativa della domanda di SPE di circa il 14%-17% rispetto alle soluzioni equivalenti non regolate, con il picco del 30% per il confronto tra Venezia F1S2 e F2S2.

Per una valutazione dettagliata dei fabbisogni di SPE per ciascuna soluzione, e per ulteriori confronti si consiglia un esame approfondito delle Tab. 5.10 e Tab. 5.11.

5.7 Conclusioni

In questo capitolo sono state impostate simulazioni volte a ottimizzare il sistema edificio-impianto, compreso il sistema di generazione, nel caso di climatizzazione invernale; in particolare si sono considerati sia edifici vecchi, non termicamente isolati, che nuovi, con ottime caratteristiche di isolamento termico. Ciò per distinguere tra retrofit di impianti anche per edifici storici o per i quali è fortemente oneroso un intervento sull'involucro, e per edifici per cui interventi di coibentazione dell'involucro sono possibili, e per nuovi edifici. L'analisi ha messo in evidenza come per il caso di riferimento, ovvero edifici vecchi, non termicamente isolati, con sistemi di generazione non efficienti e di emissione con terminali ad alta temperatura, si possano raggiungere comunque ottimi risultati in termini di risparmio energetico agendo sull'impianto e sul sistema di conversione dell'energia termica (ovvero retrofit di impianti). Inoltre, per edifici nuovi, o sottoposti a riqualificazioni energetiche che interessano l'involucro, è stata individuata la soluzione energeticamente più efficiente.

Per quanto riguarda gli edifici vecchi (Caso Base) per i quali si è lasciato il sistema di emissione a radiatori, si sono riscontrati risparmi massimi di energia primaria di circa il 35% per il clima di Venezia, e del 33% per il clima di Stoccolma nel cambiare il sistema di generazione da caldaia tradizionale a basso rendimento e gestita in modo intermittente, ad una a condensazione che viene utilizzata in condizioni ottimali, ovvero tali da permettere la condensazione dei fumi, dunque con una strategia di riscaldamento in continuo e su due livelli di temperatura di set point (set back). Si segnala che quest'intervento comporta significativi risparmi energetici a fronte di una spesa contenuta, ovvero la sostituzione del sistema di generazione. Inoltre in tal modo si realizza la possibilità di ridurre la potenza di progetto (ad esempio, per il clima di Venezia e caldaia gestita in modalità set-back la potenza di progetto è del 35% inferiore rispetto quella del Caso Base) ed ottimizzare il funzionamento della caldaia stessa. Se fosse possibile agire anche sul sistema di emissione, e dunque installare sistemi radianti in sostituzione dei radiatori, il risparmio relativo al Caso Base può raggiungere il 60% per il clima di Venezia ed il 45% per quello di Stoccolma, nel caso di sistema radiante a pavimento con pompa di calore, modalità set-back e sistema di controllo e regolazione proporzionale.

Con riferimento a edifici nuovi o per i quali si sia intervenuto sull'involucro, la soluzione energeticamente più efficiente risulta quella con sistema radiante a pavimento, modalità di

gestione set-back, sistema di controllo e regolazione proporzionale, con pompa di calore, la quale porta ad un fabbisogno specifico rispettivamente di circa $12 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, e $48 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ per i climi di Venezia e Stoccolma.

Per quanto riguarda il teleriscaldamento, si è mirato ad individuare il sistema di conversione dell'energia termica energeticamente più efficiente per la climatizzazione invernale. Nel caso di distretti costituiti in maggioranza da vecchi edifici, o da equilibrio tra edifici vecchi e nuovi, la migliore soluzione ottenuta è la combinazione di pompa di calore con strategia set-back per entrambi i climi con l'eccezione della soluzione R1S1 di Stoccolma per la quale risulta energeticamente più efficiente la caldaia a condensazione. I fabbisogni specifici minimi raggiungibili sono di $93 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ e $54 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ rispettivamente per reti di teleriscaldamento con maggioranza di edifici vecchi, ed equilibrio tra vecchi e nuovi nel clima di Venezia, e di $254 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ e $155 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ nel caso vi sia maggioranza di edifici vecchi, ed equilibrio tra vecchi e nuovi nel clima di Stoccolma, con caldaia a condensazione e pompa di calore rispettivamente. Per reti di teleriscaldamento a servizio di edifici nuovi la migliore soluzione risulta l'impiego di pompe di calore. Quanto ora espresso non si riferisce ad alcuna variazione del sistema di emissione a radiatori. Per quanto riguarda i sistemi radianti, l'utilizzo delle pompe di calore di grossa taglia risulta la soluzione migliore per entrambi i climi; con riferimento al caso di edifici vecchi, sebbene si siano considerati per le reti di teleriscaldamento edifici sia vecchi che nuovi, sia nel caso di Venezia che di Stoccolma si registra una diminuzione del fabbisogno specifico, rispetto al singolo edificio, con risparmi tra 25%-30% a parità di soluzioni considerate.

Con riferimento ai diagrammi dell'energia primaria e dell'exergia di Fig. 5.3.1 e Fig. 5.3.2, si può osservare come essi siano particolarmente immediati per valutazioni sui singoli sistemi di distribuzione e sull'intero sistema, dunque facilitino la scelta del sistema di generazione più efficiente.

5.8 Bibliografia

- Busato, F. *Analisi del funzionamento stagionale di generatori di calore a condensazione*. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Padova, Dicembre 2005, 2005.
- Cavallini, A, e L Mattarolo. *Termodinamica applicata*. Padova Febbraio 1992: CLEUP, 1992.
- De Carli, M, et al. «Nuovo approccio nella riqualificazione energetica degli edifici e nella loro gestione.» *AICARR Conference, Bologna, October 2007*. 2007.
- DLgs 192/05. «Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.» *Gazzetta Ufficiale n.222 del 23 Settembre 2005 suppl. ord. n. 158, 19 Agosto 2005*.
- DLgs 311/06. «Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311. Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.» *Gazzetta Ufficiale n.26 del 1 Febbraio 2007 suppl. ord. n. 26/L., 29 Dicembre 2006*.
- DPR 59/09. «Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n. 59. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico.» *Gazzetta Ufficiale n.132 del 10 Giugno 2009, 2 Aprile 2009*.
- EC. *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings*. Official Journal of the European Communities, 2002.
- EN 15316-1:2007. «Heating systems in buildings - Methods for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 1: General 2007.» 2007.
- EN 15316-2-1:2007. «Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 2-1: Space heating emission systems.» 2007.
- EN 15316-2-3:2007. «Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 2-3: Space heating distribution systems.» 2007.
- EN ISO 13790:2008. «Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling.» 2008.
- ENERGY PLUS. «ENERGY PLUS Energy Simulation Software, U.S. Department of Energy.» 2010.
- Haines, R W, e D C Hittle. *Control Systems for Heating, Ventilating and Air Conditioning, Sixth Edition*. Kluwer Academic Publishers. 2003.

Mazzarella, L. «Dati Climatici “G. De Giorgio”.» *Atti Giornata di studio a memoria "Giovanni deGiorgio" Politecnico di Milano, Dip. Energetica*. Milano, 18 Novembre 1997, 1997.

Schibuola, L. *La pompa di calore elettrica reversibile nelle sue applicazioni*. Padova, Marzo 1999: Progetto Leonardo Editore, 1999.

TRNSYS. *TRNSYS Manual, A Transient Simulation Program*. Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison, 2000.

6 Capitolo 6. Conclusioni

In questo lavoro si sono discussi numerosi aspetti legati alle caratteristiche dell'involucro edilizio ed alla valutazione dei fabbisogni per la climatizzazione per edifici dei settori residenziale e terziario. In particolare, si sono analizzate metodologie di misura per caratterizzare l'edificio in opera e, parallelamente, si è proceduto all'ottimizzazione dei metodi di valutazione del fabbisogno per la climatizzazione attraverso uno studio con simulazioni dinamiche. Infine, si è studiato il caso di retrofit di impianti per edifici esistenti, e si sono individuate le modalità di gestione dell'impianto ed i sistemi di generazione più energeticamente efficienti per edifici nuovi, e per alcune soluzioni di reti di teleriscaldamento. Tutto ciò ha mirato alla coniugazione degli aspetti teorico e pratico per l'approccio alla valutazione del reale fabbisogno di energia per la climatizzazione, e dunque per il raggiungimento dell'obiettivo del maggior risparmio energetico.

Per quanto riguarda la caratterizzazione dell'involucro si è verificata l'esigenza di introdurre una fase di verifica in opera di quanto prescritto in sede progettuale. A tal proposito, per quanto riguarda le misure di conduttanza termica in opera, nel Capitolo 2, l'analisi teorica ha contribuito alla valutazione del contributo di diversi fattori che influiscono sul processo di misura stesso, tra cui la presenza del regime dinamico nei dati rilevati e la presenza del flussimetro nel sistema considerato. Il contributo di questi fattori, mediante analisi con diversi metodi di post-processing, è stato valutato relativamente ad un caso studio di riferimento attraverso simulazioni FEM con dati derivanti da un caso reale, secondo le indicazioni di lavori presenti in letteratura. Inoltre, si sono valutate l'entità dell'influenza di una differenza di emissività tra superficie di intonaco e flussimetro, aspetto che i lavori in letteratura non considerano in maniera approfondita, l'influenza sul risultato finale dell'incertezza legata al rilevamento dei dati di input e la possibilità di misurare la temperatura superficiale del flussimetro anziché quella della superficie interna. Da quest'analisi, dunque, si sono potuti ricavare alcuni suggerimenti per il miglioramento della catena di misura, quali appunto la rilevazione della temperatura superficiale del flussimetro, e per la metodologia di misura, un approfondimento della differenza di comportamento alla radiazione di flussimetro ed intonaco. Inoltre, si è messo in rilievo come potrebbe essere presa in considerazione l'ipotesi di valutare preventivamente i dati di input per stimare l'eventuale influenza di una caduta di temperatura non trascurabile nelle serie di dati sul

risultato finale. Con riferimento ai metodi di post-processing sembra che l'approccio del software LORD abbia garantito i migliori risultati per il caso di studio analizzato. Per quanto riguarda la campagna di misure, questo lavoro ha rappresentato uno sforzo per caratterizzare il parco edilizio italiano esistente. Date le disposizioni legislative vigenti in materia energetica, ed in maniera particolare per il caso italiano dei DLgs 192/05, DLgs 311/06 e DPR 59/09, si è cercato di verificare se gli edifici rispettino realmente quanto prescritto. In particolare, adottando l'approccio del software LORD si è registrato, con riferimento ai casi di edifici moderni analizzati, un aumento del 20% circa del valore di C misurato rispetto a C_{nom} . Come ampiamente discusso, viste le caratteristiche e criticità che la misura presenta e poiché i materiali in opera sono sottoposti all'azione degli agenti atmosferici e a sollecitazioni termiche molto diverse fra loro a seconda dei periodi dell'anno, determinando variazioni delle proprietà dei materiali stessi difficilmente stimabili in sede di progetto, sembra necessario distinguere tra la definizione di criteri di legge relativi alla misura in opera e validi in progettazione. Infatti l'esigenza più importante è garantire che l'edificio sia effettivamente costruito secondo criteri di risparmio energetico poiché si vuole ridurre il fabbisogno per la climatizzazione, anche mediante un controllo sullo stato di fatto del costruito; è noto infatti che ogni edificio può presentare valori diversi (come i casi analizzati evidenziano) tra C_{nom} e valore in opera. Ciò può avvenire ad esempio a causa di eventuali operazioni di posa non eseguite a regola d'arte. In quest'ottica si è segnalata l'utilità di un database per caratterizzare il parco edilizio esistente dal punto di vista del valore di conduttanza in opera, per definire criteri di riferimento da rispettare (ad esempio riguardo la posizione del giunto di malta), ad esempio distinguendo in base all'anno di costruzione ed alla zona climatica in cui è situato l'edificio stesso. Dunque, la verifica in opera potrebbe essere prescritta per legge una volta stabiliti tali criteri, ad integrare quanto già previsto in sede progettuale per la caratterizzazione energetica degli edifici; inoltre potrebbe essere introdotto un sistema di merito per le unità più virtuose e per le imprese di costruzione che le hanno realizzate. A seguito di misura in opera, uno scostamento da valori di riferimento opportunamente definiti certificherebbe la presenza di un'anomalia nell'elemento. Per quanto riguarda il fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale netta dell'edificio, si è notata una certa differenza tra quello valutato implementando il valore nominale di conduttanza per le strutture e quello ricavato dall'analisi delle misure effettuate; in particolare in quest'ultimo il fabbisogno netto dell'edificio risulta superiore di un'entità variabile a seconda del clima e del valore di conduttanza di riferimento (con il picco del +19% nel clima di Venezia e per i valori

nominali di conduttanza di $0.20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Tuttavia nell'analisi teorica si è evidenziato come la misura in opera fornisca una sottostima del valore di conduttanza: dunque l'aumento del fabbisogno potrebbe risultare in realtà addirittura superiore.

Per quanto riguarda la determinazione della permeabilità all'aria degli edifici mediante prova di pressurizzazione, nel Capitolo 3, nell'analisi teorica sono stati descritti i metodi attraverso cui svolgere le prove ed i risultati da queste ottenibili, con particolare attenzione alla definizione dei principali modelli di correlazione esistenti in letteratura tra permeabilità ed infiltrazione per un edificio. Successivamente si sono discussi i risultati di una campagna di prove di pressurizzazione di edifici in Veneto; sono stati misurati complessivamente 32 appartamenti, 4 case a schiera ed una casa singola. E' emerso che circa il 60% degli appartamenti testati presentavano un livello medio di impermeabilità, il 3% erano altamente impermeabili e la restante percentuale era composta da unità a bassa impermeabilità, secondo quanto riportato nella EN ISO 13789:2007. Due delle quattro case a schiera sono risultate ad elevata impermeabilità e le restanti a media tenuta, e la casa singola, la quale è stata interessata da un intervento di riqualificazione, è risultata ad alta impermeabilità. Per quanto riguarda l'indagine di una correlazione tra n_{50} ed ELA e perimetro degli infissi, non si è notato un legame tra le due grandezze, né per le prove con metodo A, né per quelle con metodo B (mediante il quale non si considerano le aperture per la ventilazione naturale); pertanto non sembra possibile mettere in relazione la permeabilità all'aria di un involucro con il solo contributo che sarebbe dovuto ai serramenti. La permeabilità all'aria è una proprietà dell'edificio legata ad una complessità di fattori, tra cui sembrano rilevanti, oltre all'apporto dovuto ai serramenti, la presenza del tetto e la posa in opera dei materiali eseguita a regola d'arte. A quest'ultimo proposito sembra possibile affermare che la permeabilità all'aria di un involucro sia una proprietà caratteristica dello stesso, ed edifici che in sede di progetto presentano le stesse caratteristiche in opera non sempre garantiscono lo stesso risultato, come hanno evidenziato i casi degli appartamenti 27 e 31, e 20, 24 e 25 (metodi A e B), e le case a schiera 3 e 4 (metodo A). Tuttavia, il caso delle case a schiera 1 e 2 (metodi A e B) ha messo in risalto come, se le maestranze sono particolarmente abili, e se l'esecuzione è disposta a regola d'arte, sia possibile garantire le stesse proprietà di permeabilità per unità identiche. Per quanto riguarda l'influenza dei fori per la ventilazione naturale, l'analisi in Fig. 3.5.4 ha evidenziato come questa sia stata più rilevante per le unità maggiormente impermeabili, con aumento medio relativo dell' n_{50} riscontrato dalla prova con metodo A rispetto quella con metodo B di circa il 70% per le unità con valori di n_{50} ottenuti da prova con metodo A

inferiori a 3 h^{-1} , e si è ridotta fino al 10% circa per gli edifici con valori di n_{50A} compresi tra 4 h^{-1} e 7 h^{-1} . Applicando i metodi di infiltrazione è risultato che, per la maggioranza degli appartamenti considerati (con valori percentuali che variano a seconda del modello considerato), l'indice n è stato inferiore a 0.3 h^{-1} , valore considerato in sede di progetto in UNI/TS 11300-1:2008, eccezion fatta per le analisi con il metodo Sherman1, per il quale il 50% degli appartamenti testati ha presentato un valore inferiore e la restante metà un valore superiore di quello suindicato. Tutti gli appartamenti, comunque, avrebbero presentato un indice n minore di 0.5 h^{-1} considerato da (Naydenov, Schiavon e Zecchin 2009) come riferimento per la ventilazione degli ambienti residenziali, anche in questo caso con l'eccezione dell'applicazione del metodo di Sherman1. Per quanto riguarda le case a schiera, è risultato per tutti i casi analizzati un indice n inferiore al valore espresso in UNI/TS 11300-1:2008; il metodo di Persily non è sembrato adeguato poiché per le unità 1 e 2 questo avrebbe presentato valori di n negativi. Anche il caso di casa singola è caratterizzato da valori di n inferiori a quanto considerato in UNI/TS 11300-1:2008. Dunque si segnala che, laddove non presente un sistema di ventilazione meccanica controllata, la maggioranza degli edifici sarebbe risultata non adeguatamente ventilata, mentre per il caso in cui è presente il sistema di ventilazione meccanica, solo per le case a schiera 1 e 2 è stato garantito il funzionamento ottimale dell'impianto, mentre si segnala un'entità rilevante del contributo legato alla ventilazione naturale per gli appartamenti 1, 6 e 17. Infine, per quanto riguarda la modellizzazione numerica di unità di cui erano noti i valori di n_{50} ed ELA misurati, e per i quali si è ripartita l'ELA misurata all'interno dell'unità stessa, l'analisi ha evidenziato come il modello di infiltrazione che sembra garantire i risultati migliori sia stato quello denominato Sherman3, con una sottostima per il caso della stagione invernale e una sovrastima per quello annuale (si confronti Tab. 3.9 per un esame dei valori numerici). Tuttavia anche il modello di Persily su base annua è sembrato offrire una stima adeguata. Si segnala l'utilità dell'analisi svolta poiché, attraverso questa e a partire da una prova di pressurizzazione sull'edificio, sarebbe possibile ricavare il valore dell'indice di ricambio orario n realmente riscontrato in opera.

Per quanto riguarda l'analisi dei fabbisogni energetici nel Capitolo 4, i risultati delle simulazioni dinamiche in 4.3 e 4.6 hanno messo in evidenza alcuni aspetti. Con riferimento al caso degli uffici, per i tre climi di Milano, Roma e Palermo considerati si è evidenziato come sia necessario il raffrescamento anche in inverno: si segnala quindi la possibilità di ricorrere al free cooling. Nel settore terziario, data l'entità dei carichi interni, il fabbisogno per il riscaldamento

ha rappresentato una quota minoritaria dell'intero fabbisogno per la climatizzazione, pertanto si segnala come l'aspetto fondamentale da considerare per questa tipologia edilizia in sede di progettazione sia il raffrescamento estivo, non solo sensibile, ma anche latente. Inoltre all'utente PM, ovvero quello meno oculato nella gestione dei dispositivi di shading e dell'illuminazione, è corrisposto il minor fabbisogno netto dell'edificio (in particolare si è raggiunto circa il 15% di aumento relativo del fabbisogno netto per la climatizzazione estiva nel clima di Palermo per la soluzione con recuperatore nel passare da utente PM a utente MAD, tuttavia è da sottolineare che il fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione è pressoché raddoppiato nel passare da utente MAD a utente PM. La presenza del recuperatore è apparsa molto utile in inverno per il solo riscaldamento nel clima di Milano, dove il fabbisogno si è ridotto da $10 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ a $0 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, mentre d'estate si è osservata una diminuzione relativa di circa il 3% della richiesta di energia. Nei climi di Roma e Palermo, dove il riscaldamento invernale è apparso trascurabile, la riduzione del fabbisogno di energia per la climatizzazione estiva è stata di circa il 7% con la presenza del recuperatore (soluzione B rispetto ad A). Si noti che le simulazioni di tipo C sono coerenti con le condizioni al contorno disposte dalla UNI/TS 11300-1:2008, mentre le simulazioni di tipo A e B tengono conto dei valori orari di affollamento mediante simulazione con software DAYSIM (NRCC 2010). I valori dei fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva considerando la tipologia C sono risultati decisamente inferiori rispetto alla soluzione A (valore massimo di riduzione relativa del 28% nel clima di Roma nel passare da soluzione C ad A), pertanto è consigliabile una revisione delle condizioni al contorno e del set-point per le valutazioni standard o di progetto della UNI/TS 11300-1:2008 per quanto riguarda il settore terziario. Per quanto riguarda il riscaldamento adottando l'approccio della UNI/TS 11300-1:2008 nel clima di Milano si è registrato un aumento del fabbisogno di energia per la climatizzazione (circa il 10% di aumento relativo della soluzione C rispetto ad A); anche per i casi di raffrescamento invernale nei climi considerati si è registrato un aumento del carico richiesto (circa il 10% di aumento relativo). Dunque il calcolo secondo valutazioni standard o di progetto UNI/TS 11300-1:2008 in regime invernale ha portato ad una sovrastima dei carichi. Per quanto riguarda gli edifici del settore residenziale, si è evidenziato come la quota per il raffrescamento costituisca il maggiore onere per la climatizzazione per i climi di Roma e Palermo, mentre in quello di Milano i maggiori carichi sono stati richiesti per il riscaldamento. Nel passare da struttura massiva a leggera, per il clima di Milano si è registrata la diminuzione massima dell'8% in regime invernale, e nessuna variazione in due casi; per il caso estivo si sono riscontrati invece

valori simili dei fabbisogni per le varie soluzioni considerate. Per i climi di Roma e Palermo, in particolare riguardo il fabbisogno per il raffrescamento, il caso di strutture leggere ha comportato una diminuzione relativa (con il valore picco del 10%) del fabbisogno per tutte le soluzioni. Per il settore residenziale si è notato come considerare una temperatura costante di set-point, come da approccio standard o di progetto della UNI/TS 11300-1:2008, abbia generato un aumento della quota richiesta per il fabbisogno sensibile di riscaldamento, con il picco del 15% per il clima di Milano (da soluzione A a B legno) dove il fabbisogno per il riscaldamento è più rilevante, dunque abbia portato ad una sovrastima del carico. Per quanto riguarda la climatizzazione estiva, occorre evidenziare come il contributo della deumidificazione non sia stato trascurabile, specialmente nei climi più caldi; aver considerato l'approccio di progetto di UNI/TS 11300-1:2008 ha portato ad una sottostima del fabbisogno per la climatizzazione estiva per edifici del settore residenziale rispetto alla valutazione anche del fabbisogno latente, con il picco del 40% nel clima di Roma (da soluzione C a D struttura massiva e in legno). Dunque, l'approccio di progetto o standard della UNI/TS 11300-1:2008, secondo questo lavoro, ha portato ad una sovrastima del fabbisogno per la climatizzazione invernale, quindi in favore di sicurezza, mentre ha causato una notevole sottostima del fabbisogno per la climatizzazione in regime estivo: pertanto si segnala la necessità di una sua revisione.

Con riferimento alle simulazioni volte a ottimizzare il sistema edificio-impianto, compreso il sistema di generazione, per la climatizzazione invernale nel Capitolo 5, si sono considerati sia edifici vecchi, non termicamente isolati, che nuovi, con ottime caratteristiche di isolamento termico. Ciò per distinguere tra retrofit di impianti per edifici storici o per i quali sarebbe fortemente oneroso un intervento sull'involucro, e per edifici per cui interventi di coibentazione dell'involucro sono possibili, e per nuovi edifici. L'analisi ha messo in evidenza come per il caso di riferimento, ovvero edifici vecchi, non termicamente isolati, con sistemi di generazione non efficienti e di emissione con terminali ad alta temperatura, si siano potuti raggiungere comunque ottimi risultati in termini di risparmio energetico agendo sull'impianto e sul sistema di conversione dell'energia termica (ovvero retrofit di impianti). Inoltre, per edifici nuovi, o sottoposti a riqualificazioni energetiche che interessano l'involucro, è stata individuata la soluzione energeticamente più efficiente. Per quanto riguarda gli edifici vecchi (Caso Base) per i quali si è lasciato il sistema di emissione a radiatori, si sono riscontrati risparmi massimi di energia primaria di circa il 35% per il clima di Venezia, e del 33% per il clima di Stoccolma nel cambiare il sistema di generazione da caldaia tradizionale a basso rendimento e gestita in modo

intermittente, ad una a condensazione utilizzata in condizioni ottimali, ovvero tali da permettere la condensazione dei fumi, dunque con una strategia di riscaldamento in continuo e su due livelli di temperatura di set point (set back). Si è segnalato che quest'intervento abbia comportato significativi risparmi energetici a fronte di una spesa contenuta, ovvero la sostituzione del sistema di generazione. Inoltre in tal modo si è realizzata la possibilità di ridurre la potenza di progetto (ad esempio per il clima di Venezia, per caldaia a condensazione gestita in modalità set-back, la potenza di progetto è del 35% inferiore rispetto a quella del caso CB) e di ottimizzare il funzionamento della caldaia stessa. Se si fosse potuto agire anche sul sistema di emissione, dunque installando sistemi radianti in sostituzione dei radiatori, il risparmio relativo al Caso Base avrebbe raggiunto il 60% per il clima di Venezia ed il 45% per quello di Stoccolma, nel caso di sistema radiante a pavimento con pompa di calore, modalità set-back e sistema di controllo e regolazione proporzionale. Con riferimento a edifici nuovi o per i quali si sia intervenuto sull'involucro, la soluzione energeticamente più efficiente è risultata quella con sistema radiante a pavimento, modalità di gestione set-back, sistema di controllo e regolazione proporzionale, con pompa di calore, la quale ha portato ad un fabbisogno specifico rispettivamente di circa $12 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, e $48 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ per i climi di Venezia e Stoccolma. Per quanto riguarda il teleriscaldamento, si è mirato ad individuare il sistema di conversione dell'energia termica energeticamente più efficiente per la climatizzazione invernale. Nel caso di vecchi edifici, o da equilibrio tra edifici sia vecchi che nuovi, la migliore soluzione ottenuta è derivata dalla combinazione di pompa di calore con strategia set-back per entrambi i climi con l'eccezione della soluzione R1S1 di Stoccolma per la quale è risultata energeticamente più efficiente la caldaia a condensazione. I fabbisogni specifici minimi raggiungibili sono stati di $93 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ e $54 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ rispettivamente per reti di teleriscaldamento con maggioranza di edifici vecchi, ed equilibrio tra vecchi e nuovi nel clima di Venezia, e di $254 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ e $155 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ per distretti con maggioranza di edifici vecchi, ed equilibrio tra vecchi e nuovi nel clima di Stoccolma, con caldaia a condensazione e pompa di calore rispettivamente. Per reti di teleriscaldamento a servizio di edifici nuovi la migliore soluzione è risultata l'impiego di pompe di calore. Quanto ora espresso non si riferisce ad alcuna variazione del sistema di emissione a radiatori. Per quanto riguarda i sistemi radianti, l'utilizzo delle pompe di calore di grossa taglia è risultata la soluzione migliore per entrambi i climi; con riferimento al caso di edifici vecchi, sebbene si siano considerati reti costituite da edifici sia vecchi che nuovi (ma con il 90% di edifici vecchi), sia nel caso di Venezia che di Stoccolma si è registrata una diminuzione del

fabbisogno specifico, rispetto al singolo edificio non isolato, con risparmi tra 25%-30% a parità di soluzioni considerate. Infine, i diagrammi dell'energia primaria e dell'exergia si sono dimostrati particolarmente immediati per valutazioni sui singoli sistemi di distribuzione e sull'intero sistema, dunque potrebbero costituire uno strumento utile per la scelta del sistema di generazione più efficiente a livello di politica energetica.

Quanto messo in luce da questo lavoro può risultare particolarmente utile sia per la caratterizzazione dell'edificio in opera, sia per la valutazione dei fabbisogni di energia e di soluzioni ottimali finalizzate al risparmio energetico nella climatizzazione estiva ed invernale di edifici nuovi ed esistenti.