

Una proposta per la climatizzazione ambientale del Salone De' Cinquecento

CARLA BALOCCO, GIUSEPPE GRAZZINI

Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco", via S. Marta 3, 50139 Firenze

RIASSUNTO

Il crescente interesse per la valorizzazione del vasto patrimonio storico-artistico italiano e la necessità di una migliore conservazione delle opere richiedono la valutazione dell'impiego di idonei impianti di climatizzazione. Ciò è ancora più importante quando lo stesso edificio è di per sé opera d'arte, come nel caso del Salone dei Cinquecento oggetto del presente lavoro. I requisiti di stabilità delle condizioni microclimatiche sono tra i più vincolanti. E' necessario ridurre le oscillazioni delle grandezze termofisiche, più pericolose spesso dei valori assoluti di esse, assicurando un sufficiente livello di benessere agli utenti.

La necessità della climatizzazione del Salone si lega all'utilizzo, anche di rappresentanza, che se ne fa dello stesso così come al risparmio ed uso razionale dell'energia.

Le condizioni invernali sono spesso lontane dalla condizione di comfort; in estate il problema è meno sentito. Data la struttura architettonica del Salone e la mancanza di spazi e vani in cui alloggiare gli impianti, la soluzione proposta in questo articolo è basata sulla minima incidenza e sul concetto di reversibilità, cioè la possibilità di ripristinare le condizioni attuali nel modo più rapido possibile. Viene proposta come soluzione impiantistica una pedana che contiene gli impianti appoggiata al pavimento esistente. Essa deve essere, per quanto possibile, modulare: modularità intesa sia in senso costruttivo che funzionale.

Questo sistema, che rientra nella soluzione di pannelli radianti sottili poggianti su di un isolante, protetti superiormente da una lastra metallica per permettere di appoggiare le sedie ed il transito delle persone, è stato studiato con una simulazione in transitorio.

1. DESCRIZIONE ARCHITETTONICA E FUNZIONALE

Il Salone Dei Cinquecento, ubicato al primo piano nella parte centrale di Palazzo Vecchio, in adiacenza alla sala Leone X, si caratterizza come un unico ambiente dalla forma trapezoidale con lati minori divergenti, presentando un'estensione di circa 1 000 m² ed un volume di 20 000 m³ (fig.1-2).

La parete ad Est misura 61.9 m, quella ad Ovest 52.56 e tra le due intercorrono, sul lato regolare, 22.10 m. Si contano in tutto quattro accessi, con dimensioni superiori ai 90 cm: quello principale di ingresso-uscita situato in fondo alla parete est, quello sulla pedana delle

udienze, quello sul lato del corpo di guardia dei vigili collocato al centro della parete ovest, comunicante con un corpo scala che conduce al piano terra, e quello comunicante con la Sala Leone X, che tramite un corridoio collegato all'ufficio del Sindaco, porta alla scala proveniente dai piani superiori. Di fatto solo tre di questi vengono comunemente utilizzati: quello principale ed i due secondari situati l'uno di fronte all'altro sui lati Ovest ed Est.

La luce naturale filtra all'interno dell'ambiente attraverso due ordini di finestre, uno superiore che conta tre, due e quattro finestroni ad arco rispettivamente nella facciata Nord, Est ed Ovest, ed uno superiore costituito da dieci finestrine rettangolari di piccola dimensione.

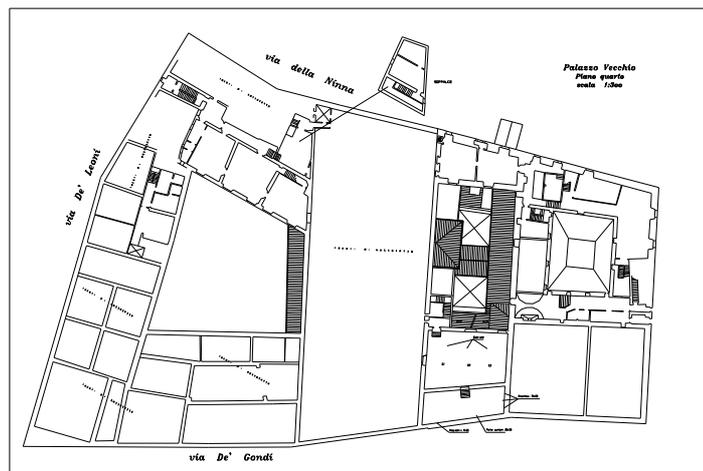


Figura 1. Planimetrico

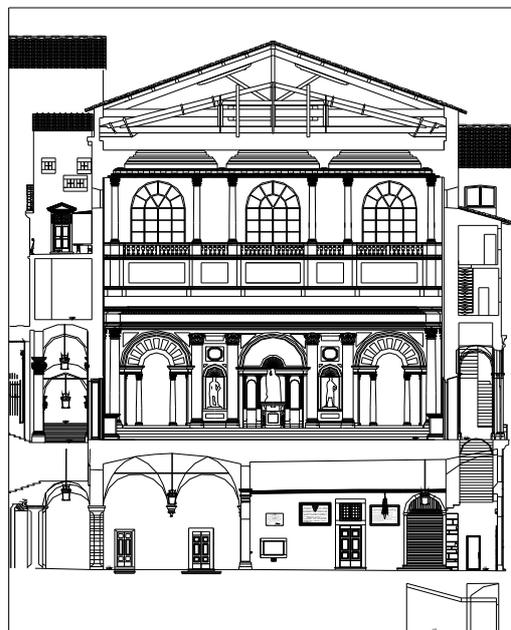


Figura 2. Sezione



Figura 3. Vista interna del Salone De' Cinquecento

Una serie di piantane alte circa due metri e disposte regolarmente lungo i due lati maggiori, unitamente a faretti posizionati localmente, assicurano la visibilità delle opere esposte nella sala.

Le pareti, due delle quali perimetrali, intonacate e rivestite nella parte inferiore da pietre e marmi, presentano affreschi e decorazioni pittoriche per la quasi totalità della loro estensione: otto sono le tele di grandi dimensioni realizzate ad olio e contornate mediante cornici dorate ed intarsiate, vuote al loro interno.

Le sedici statue di marmo (tra cui "La Vittoria" di Michelangelo, situata al centro della parete est) sono esposte al centro di nicchie realizzate in marmo e pietra, decorate superiormente mediante stucchi dorati recanti indicazioni ed omaggi ai personaggi scolpiti nelle opere. Il pavimento poggia sulle sottostanti volte del cortile della Dogana del Palazzo e la relativa pavimentazione è realizzata in cotto, intervallato da guide in pietra serena che definiscono nell'insieme una ripartizione rettangolare dell'impiantito [2,10].

Il delicato sistema di copertura, costituito dalla "macchina architettonica" realizzata da Giorgio Vasari, sostiene, grazie ad un doppio ordine di capriate di cui uno rovescio, la modanatura a cassettoni ed il soffitto del Salone, decorato con trentanove dipinti ad olio in aggiunta alle tre piccole tavole triangolari necessarie a chiudere il lato irregolare della sala [10].

La zona di copertura risulta ventilata mediante ampie griglie posizionate sul lato della muratura esterna (fig.3-4).

Per quanto riguarda la destinazione della sala questa costituisce il principale luogo di rappresentanza della vita comunale e cittadina: risulta infatti sede di funzioni amministrative ed economiche, cerimonie, convegni, incontri, concerti nonché allestimenti di camere ardenti

per celebrazione di funerali di Stato.

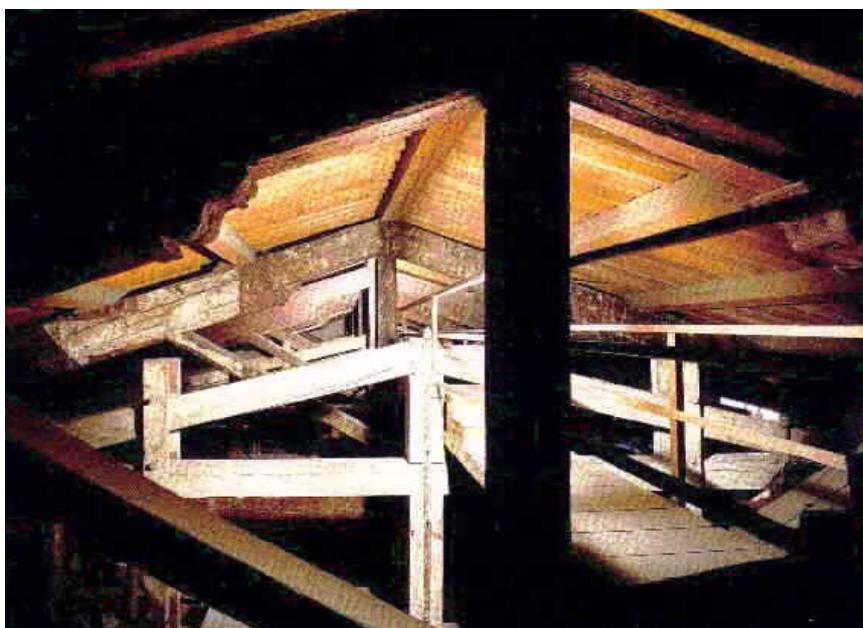


Figura 4. Il tetto: la “macchina architettonica” del Vasari

A questa attività si aggiunge quella a destinazione museale inserita nel progetto Palazzo Vecchio - Quartieri Monumentali. Ovviamente la convivenza di attività così differenti comporta non poche situazioni di adeguamento finalizzate ad una sorta di compromesso inevitabile data la coesistenza delle due nature: da una parte Palazzo Vecchio e quindi il Salone sono storicamente sede di alta rappresentanza dell'amministrazione fiorentina, dall'altra ciò ne impedisce il pieno uso delle potenzialità del museo peraltro soggetto a flussi di visitatori in costante crescita.

2. IL CLIMA INTERNO

La conoscenza dei dati climatici all'interno del Salone è stata resa possibile dall'analisi dei risultati della campagna di rilevamento dei valori termoigrometrici condotta, in un periodo di tempo di undici mesi (21 Dicembre 2001 – 21 Novembre 2002), per conto del Comune, dall'Opificio delle Pietre Dure di Firenze [7].

Per facilitare l'interpretazione dei dati il Salone è stato suddiviso in quattro “macroaree” a cui sono state assegnate, da Sud a Nord, le prime quattro lettere dell'alfabeto. Nel corso della campagna i ventisette sensori impiegati hanno consentito di monitorare, tanto sul piano planimetrico che stratigrafico, grazie ad una loro disposizione a tre differenti altezze rispetto al piano di calpestio (2 m, 8m e sul soffitto), i valori di temperatura e di umidità relativa da cui si è potuto evincere come generale e prevalente tendenza quella di una temperatura che incrementa sensibilmente procedendo dal pavimento verso il soffitto, oscillando nel corso dell'anno tra gli 8 e 30°C.

In corrispondenza di tale andamento si registrano escursioni annuali di umidità relativa comprese tra il 28% ed il 71%, ed una sensibile ma costante dilatazione termica dei materiali presenti nella zona superiore rispetto a quella sottostante.

Lungo le pareti i valori termici sono abbastanza stabili mentre si registrano oscillazioni più frequenti e marcate nei diversi punti del soffitto presi in esame.

Una situazione particolare è stata rilevata in corrispondenza di alcuni sensori posti grosso modo nelle zone corrispondenti al centro del Salone: qui la tendenza si inverte drasticamente e si registra una temperatura più fredda nella fascia superiore e sul soffitto, a cui si accompagna un incremento di umidità; tale peculiarità risulta motivata dal fatto che la zona monitorata da questi apparecchi, coincidente pressappoco con l'area centrale del Salone, non risente dell'irraggiamento solare in nessun periodo dell'anno, ed è maggiormente influenzata dalla presenza di visitatori.

Analizzando i dati raccolti dai sensori, posizionati lungo la parete Nord in corrispondenza delle finestre, è stato possibile evincere una netta differenziazione tra i valori termometrici della fascia inferiore e di quella superiore, maggiormente evidente nei periodi freddi dell'anno (Gennaio e Novembre) durante i quali i valori di temperatura dei due differenti livelli differiscono di 3-4°C, mentre quelli di umidità anche di 8-9 punti percentuali [7]. Il soffitto mostra una situazione microclimatica caratterizzata da una forte instabilità nel corso dell'anno: dal punto di vista termico risente anche dell'irraggiamento solare entrante dalle finestre situate lungo le pareti Nord e Sud. Per quanto riguarda le condizioni igrometriche l'andamento delle affluenze dei visitatori è causa della discontinua presenza di grandi quantitativi di aria umida nonché polveri ed inquinanti.

Da un punto di vista planimetrico è stato invece rilevato che la zona esposta a Sud risulta essere leggermente più calda, con oscillazioni fino ad un massimo di due gradi rispetto a quella esposta a Nord.

Nel complesso l'andamento della temperatura dell'aria interna il Salone dei Cinquecento ha un andamento di tipo stagionale con valori massimi (nel periodo estivo) nell'intorno dei 20-30°C che, unitamente a quelli di umidità relativa che si aggirano attorno al 40% - 50%, non facilitano la proliferazione di microrganismi [7].

L'umidità relativa supera raramente e per tempi sufficientemente brevi il 60%. Le maggiori sollecitazioni ai materiali organici (arredi, pitture murali e su supporto mobile) si avvertono soprattutto in occasione di manifestazioni pubbliche, durante le quali si registrano repentine escursioni a causa dell'assidua frequenza di visitatori.

I risultati ottenuti, in funzione del tipo di attività delle persone (in piedi e in cammino), circa la potenza termica rilasciata in ambiente, l'emissione di CO₂ e di vapore, mostrano l'importanza che l'afflusso di visitatori comporta ai fini del benessere nel Salone e della qualità dell'aria. Ricordiamo inoltre che le persone sono ottimi veicoli di trasporto di polveri ed inquinanti.

Il mantenimento delle condizioni ottimali per la conservazione del soffitto a cassettoni ed in particolare delle cornici dorate di esso, impone importanti prescrizioni [14,15] per le condizioni termometriche da gestire con un eventuale impianto di climatizzazione: potrebbero risultare fortemente dannosi gradienti anche ridotti di temperature e/o umidità fra l'intradosso e l'estradosso del soffitto. Dal momento che il vano sopra il soffitto è ventilato naturalmente, non è proponibile una climatizzazione di questa zona contemporaneamente al salone principale. Di fatti non è opportuno modificare le condizioni di ventilazione naturale

del vano sopra al soffitto non potendo prevedere cosa accada alle strutture, in seguito ad una modifica così importante delle condizioni ambientali.

L'utilizzo attuale del Salone prevede saltuariamente elevati picchi di affollamento di persone: il limite massimo teorico definito dal Piano di Emergenza e di Evacuazione redatto dal Comune, secondo il Decreto legislativo 626/94 art. 3, è di 390 persone.

Sono inoltre presenti sorgenti con forte erogazione di calore come in particolare le 18 lampade da 400 W ciascuna, luci di sicurezza, fari per le telecamere e per l'illuminazione occasionale durante manifestazioni e conferenze. Il carico termico indotto risulterebbe in queste occasioni particolarmente nocivo per gli ornamenti.

In merito la normativa tecnica [14] consiglia alcuni valori di riferimento in funzione ai diversi tipi di materiali. Il carico complessivo medio dovuto alle persone ed alle lampade si aggira sui 30 kW, con una immissione media di almeno 5 kg/h di vapore d'acqua.

3. PROPOSTA DI INTERVENTO

La funzione e l'uso attribuite oggi al Salone dei Cinquecento, che fanno di esso anche un museo per la promozione della cultura e comunicazione, rendono la questione della progettazione di un impianto di climatizzazione solo un aspetto di un problema molto più ampio e complesso, che riguarda la qualità dell'involucro edilizio, fattori gestionali e di manutenzione, la progettazione di percorsi di visita obbligati, la realizzazione di sistemi di controllo e monitoraggio climatico interno.

Per presentare una proposta di impianto di climatizzazione per il Salone dei Cinquecento di Palazzo Vecchio non è possibile prescindere da una analisi delle strutture del Salone che ne consideri il pregio artistico e storico, le caratteristiche strutturali, le condizioni di conservazione e da una valutazione degli indici di affollamento previsti per l'utilizzo della sala. Da alcuni dati inerenti i Quartieri Monumentali che ci sono stati forniti dalla Direzione Cultura – Servizio Musei Comunali, sulle affluenze in Palazzo Vecchio, è stato possibile valutare l'affluenze media dei visitatori del Museo per alcuni mesi e per un giorno tipo, come mostrano le tabelle I e II.

I risultati ottenuti, in funzione del tipo di attività delle persone (in piedi e in cammino), sulla potenza termica rilasciata in ambiente, l'emissione di CO₂ e di vapore, mostrano l'importanza che l'afflusso di visitatori comporta ai fini del benessere nel Salone e della qualità dell'aria, in particolare al variare della temperatura di questa ultima. Le persone sono ottimi veicoli di trasporto di polveri ed inquinanti.

I tradizionali sistemi di riscaldamento comportano una stratificazione della temperatura dell'aria nell'ambiente con innalzamento dei valori nella zona adiacente al soffitto. Questo causerebbe un forte gradiente fra l'estradosso e l'intradosso considerando che la zona superiore del soffitto è a diretto contatto con l'aria esterna attraverso le griglie di ventilazione. Inoltre maggiore è la temperatura di erogazione dell'energia termica da parte dei terminali d'impianto, più marcatamente si presenta tale fenomeno. I sistemi tradizionali non permettono il controllo della temperatura in prossimità del soffitto con conseguenti danni inestimabili.

Le possibilità di intervento dovrebbero partire dalla minima incidenza sulla struttura e sulle condizioni attuali in cui essa si è "stabilizzata", seguendo le variazioni climatiche stagionali. Inoltre dovrebbero essere reversibili, ovvero dovrebbero consentire di ripristinare

le condizioni attuali nel modo più rapido possibile. Per permettere la presenza di persone con condizioni termofisiche accettabili gli interventi vanno concepiti per l'eliminazione delle esistenti situazioni "peggiorative".

Stante la struttura architettonica del Salone e la mancanza di spazi e vani in cui alloggiare gli impianti, non sarebbe facilmente proponibile una soluzione di un sistema a tutta aria o con integrazione a pavimento. La realizzazione di un impianto a pannelli radianti a pavimento sarebbe invasiva, dato che metterebbe in regime termico la struttura del solaio con conseguenti dilatazioni termiche durante i transitori di accensione che sottoporrebbero l'intera struttura a consistenti sollecitazioni termo-meccaniche.

Tabella I – Affluenza media mensile di persone ed emissioni.

Anno	Mese	Ore mensili di apertura	Persone totali nel mese	Affluenza media oraria	Potenza media in un'ora in piedi (kW)	Emissione media oraria in piedi CO ₂ (litri/h)	Emissione media oraria in piedi vapore (kg/h)	Potenza media in un'ora in cammino (kW)	Emissione media oraria in cammino CO ₂ (litri/h)	Emissione media oraria in cammino vapore (kg/h)
2003	Lug	265	33 152	125	16	2 627	6.3	22	4 879	12.5
	Ago	265	38 665	146	18	3 064	7.3	26	5 690	14.6
	Sett	260	29 503	113	14	2 383	5.7	20	4 425	11.3
	Ott	270	27 067	100	13	2 105	5.0	18	3 910	10.0
	Nov	250	17 519	70	9	1 472	3.5	12	2 733	7.0
	Dic	260	20 503	79	10	1 656	3.9	14	3 075	7.9
2004	Lug	265	34 039	128	16	2 697	6.4	23	5 010	12.8
	Ago	265	43 578	164	21	3 453	8.2	29	6 413	16.4
	Sett	255	33 659	132	17	2 772	6.6	23	5 148	13.2
	Ott	265	34 594	131	16	2 741	6.5	23	5 091	13.1
	Nov	265	21 847	82	10	1 731	4.1	15	3 215	8.2
	Dic	255	23 055	90	11	1 899	4.5	16	3 526	9.0

Tabella II – Affluenza di persone durante un giorno tipo ed emissioni.

	Affluenza %	Numero di persone	Ore di occupazione	Affluenza media oraria	in piedi (kW)	in piedi CO ₂ (litri/h)	in piedi vapore (kg/h)	in cammino (kW)	in cammino CO ₂ (litri/h)	in cammino vapore (kg/h)
mattina (ore 9-14)	44.7	485	5	97	12	2 037	5	17	3 783	10
Sera (ore 14-19)	55.3	600	5	120	15	2 520	6	21	4 680	12
Giorno	totali	1 085	10	109	14	4 557	5	19	8 463	11

Il requisito della reversibilità dell'intervento ci ha portato ad una proposta impiantistica con struttura "appoggiata" su quelle esistenti e destinata al solo riscaldamento invernale. Questo sistema consente di ottenere condizioni prossime al benessere termico per i visitatori

in una zona confinata e contemporaneamente garantire un accettabile clima interno per la conservazione e tutela delle opere. La zona a "controllo del clima" confinata nell'intorno delle pedane radianti risulterebbe compresa tra il pavimento fino ad una quota non superiore ai quattro metri. Il sistema è pensato modulare e con struttura di supporto mobile che permette di adattarne le caratteristiche e l'erogazione di potenza termica alle differenti esigenze. L'alimentazione con fluido caldo sarebbe facile da realizzare utilizzando le caldaie esistenti che servono Palazzo Vecchio.

4. ANALISI DEL SISTEMA ATTIVO PROPOSTO E SUA SIMULAZIONE

Il tipo di sistema che proponiamo appartiene alle attuali soluzioni a pannelli radianti sottili, poggiati su di un isolante, protetti superiormente da una lastra metallica per permettere sia di posizionare dei posti a sedere sia il transito delle persone. Nella forma più semplice, tali sistemi sono già stati usati anche in chiese monumentali come il Duomo di Milano.

Questo sistema è modulare sia in senso costruttivo che funzionale. La modularità consente di ridurre l'impatto e di diversificare le fasi temporali dei lavori necessari per la realizzazione.

Trattasi infatti di una pedana appoggiata al pavimento, che contiene le tubazioni di fornitura acqua calda che vanno ad alimentare un sistema di pannelli radianti sottili a pavimento poggiati su di un isolante, protetti superiormente da una lastra metallica per permettere di appoggiare le sedie ed il transito delle persone.

Nel nostro caso considerando l'isolante e le tubazioni, una "pedana" di circa 10 cm di spessore permetterebbe di realizzare un impianto a pannelli a pavimento, relativamente facile da asportare anche nel caso in cui vi si facessero passare altri impianti, ad esempio quello elettrico. Molto ridotte risulterebbero le sollecitazioni termiche sulla struttura, poche sarebbero le modifiche a livello strutturale e minore l'inerzia termica rispetto ad un impianto tradizionale.

L'analisi termodinamica e fluidodinamica del sistema proposto finalizzata allo studio della distribuzione del flusso d'aria, della velocità e della temperatura nel Salone ha richiesto una sua simulazione per poter valutare l'incidenza dell'impianto sul campo di velocità, sul gradiente di temperatura e sul flusso termico convettivo, radiativo e totale nell'ambiente.

Poiché il Salone si caratterizza come un unico volume, la simulazione è partita dalla definizione di un modello 2D e successivamente 3D. Le condizioni al contorno del volume dell'ambiente studiato sono state definite opportunamente per i due modelli. Si è tenuto conto delle caratteristiche termofisiche dei differenti materiali che costituiscono le pareti opache e vetrate. Per il materiale del pavimento è stato considerato il cotto fiorentino, trascurando le parti che riguardano le due guide centrali in pietra serena e alcune guide trasversali che definiscono nell'insieme una ripartizione rettangolare dell'impiantito. Volendo tener conto del fatto che esso poggia sulle volte del cortile della Dogana del Palazzo, si è considerato un coefficiente di scambio lato esterno calcolato secondo normativa UNI [15,17].

Le pareti esterne presentano ampie finestre arcuate di cui due esposte a nord e le rimanenti tre, sul lato opposto, esposte a sud.

Il tetto è costituito da un doppio ordine di capriate, dritte e rovesce, che sostengono il soffitto del Salone e la modanatura a cassettoni dorata. La zona al di sopra del soffitto risulta

ventilata con ampie griglie di ventilazione posizionate sulla muratura perimetrale. Anche in questo caso la temperatura del sottotetto è stata calcolata ai sensi delle norme UNI [15,18]. Per l'ambiente esterno, sono stati considerati i valori della temperatura dell'aria, dell'umidità relativa e della velocità del vento, utilizzando i dati climatici dell'Anno Tipo per Firenze [1].

L'irradiazione solare sulle finestre è stata calcolata a partire dagli stessi dati tenendo conto dell'esposizione e dell'inclinazione delle superfici vetrate. Per l'ambiente interno si è fatto riferimento ai dati sperimentali della temperatura e dell'umidità relativa forniti dai risultati della campagna di misurazione e monitoraggio effettuata dall'Opificio delle Pietre Dure di Firenze [7].

MODELLAZIONE E SIMULAZIONE

Il sistema proposto per il riscaldamento invernale, che prevede il posizionamento di un modulo di 12 piattaforme radianti amovibili sulle quali verrebbero fissate 33 sedie, è stato studiato con un programma di simulazione ai volumi finiti [6]. È stato quindi eseguito uno studio, allo scopo di verificare quale fosse l'andamento del gradiente di temperatura e del flusso termico, in particolare nella zona occupata dalle sedie, lungo le pareti perimetrali e nella zona del controsoffitto.

La simulazione in transitorio ha comportato le seguenti procedure:

1. disegno della geometria del Salone in 2D sfruttando l'assialsimmetria (sezione longitudinale e trasversale);
2. definizione delle caratteristiche termofisiche dei materiali costituenti le pareti, le finestre e la controsoffittatura;
3. impostazione delle condizioni al contorno;
4. definizione della griglia del modello con differenti livelli di accuratezza;
5. valutazione delle isoterme, del flusso di calore e del campo di velocità nella sezione 2D;
6. costruzione del modello 3D dell'ambiente;
7. definizione delle nuove condizioni al contorno;
8. definizione della griglia di adattamento;
9. valutazione delle isoterme e del flusso termico nella sezione 3D;
10. valutazione delle isoterme e del campo di velocità nella sezione 3D.

La simulazione è stata condotta sul modello 2D in condizioni di regime transitorio, considerando per il clima dell'ambiente esterno un giorno tipo invernale [1] con cielo coperto ed in particolare l'ora del giorno in cui la temperatura dell'aria esterna è 0°C con 56% di umidità relativa, irraggiamento solare totale su verticale pari a 56 W/m² e velocità del vento di 2 m/s. In questo modo si è potuto tener conto di condizioni esterne cautelative e si è simulato il volume di controllo circostante l'edificio, che definisce l'ambiente esterno, per studiare il campo di velocità indotto dal vento, i flussi convettivi e radiativi rispetto alle facciate dell'edificio e dell'ambiente del Salone. A questo scopo è stato definito un profilo di velocità in funzione dell'andamento e dello spessore dello strato limite dinamico che risulta fortemente influenzato dalla forma urbana e dai corpi di fabbrica circostanti [3,9,11].

Questa prima analisi ha permesso di definire le condizioni al contorno più prossime alla situazione reale. Si è quindi passati alla simulazione dell'ambiente interno del Salone considerato come un unico volume allo stato attuale senza prevedere alcun intervento di tamponamento (sostituzione dei vetri e chiusura delle aperture del Cortile della Dogana).

Tenendo conto del transitorio di regime (accensione dell'impianto) il riscaldamento generato dalle piastre radianti, è stato schematizzato da un flusso termico costante sulla faccia superiore in funzione di una temperatura superficiale costante di 26°C. e di un coefficiente di scambio convettivo e radiativo calcolati secondo le relazioni analizzate in altri lavori [4,5,8]. Per la temperatura dell'ambiente sottotetto si è assunto un valore che a partire da quello iniziale, calcolato secondo la normativa [18], tenga conto dell'effetto del transitorio legato all'inerzia termica complessiva della struttura.

Sono state assegnate come ulteriori condizioni al contorno: la isobaricità degli ambienti limitrofi il Salone collegati a questo da porte; il valore del coefficiente di scambio termico convettivo per il pavimento, non coperto dalle pedane radianti e poggiante direttamente sulle volte del Cortile della Dogana, calcolato secondo le norme UNI [15,16,17]; l'apporto di calore dovuto al flusso termico della radiazione solare incidente sulle finestre a sud. Data la natura tridimensionale del problema, è stata eseguita una simulazione con modello 3D per controllare la distribuzione e l'andamento del campo di velocità e del gradiente termico in particolare per la zona del controsoffitto.

RISULTATI E CONCLUSIONI

E' stata analizzata la proposta di un impianto per la climatizzazione invernale del Salone Dei Cinquecento. Si riportano alcuni risultati della simulazione 2D (figg.5-9).

In fig.5 si riportano i risultati della simulazione ottenuta per l'ambiente esterno tenendo conto delle condizioni al contorno definite ed il profilo di velocità del vento.

Nelle figure 6 e 7 sono mostrati i risultati della simulazione in transitorio per il giorno più freddo dell'anno e per le ore 13, ottenuti per l'ambiente privo di piastre radianti (fig.6) e per lo stesso con presenza delle stesse (fig.7,8): si può facilmente evincere dal confronto che l'impianto proposto non comporta considerevoli gradienti verticali di temperatura specie nella zona del controsoffitto.

Analizzando il campo di velocità (fig.7) si è in presenza di vortici laminari molto ampi che non producono importanti zone di ristagno. Molto probabilmente ciò è dovuto alla presenza dei moti convettivi indotti dalle griglie di apertura e dalla ventilazione naturale del volume sottotetto che tendono a smorzare gli effetti dovuti alla stratificazione termica verso controsoffitto e quindi a stabilizzare il profilo di temperatura.

Inoltre questo sistema permette di ottenere un microambiente a temperatura mediamente costante direttamente nell'intorno delle pedane radianti ove verrebbero poste le sedie per i visitatori (fig.8): non si rileva un'apprezzabile differenza di temperatura tra la base della pedana fino ad una quota di circa 3 metri.

Il sistema impiantistico proposto che fornisce la climatizzazione invernale in una zona limitata del Salone, ma non il benessere per gli occupanti, assicura le condizioni necessarie alla tutela delle opere.

La simulazione in 3D in condizioni di regime transitorio, è stata ottenuta considerando le medesime condizioni al contorno per l'ambiente esterno ed interno, definite nel modello

2D: in fig. 9 si riportano i risultati circa il campo di velocità per l'ambiente interno indotto dalle piastre radianti.

Gli autori stanno attualmente approfondendo lo studio per mezzo della simulazione in transitorio su modello 3D (fig.9), per tener conto di come i carichi termici, igrometrici ed inquinanti (polveri, particolato e CO₂) dovuti alle persone, considerate sia sedute che in movimento, possono influire sui moti convettivi interni, sull'andamento del flusso termico totale e sulla distribuzione di temperatura.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è un ampliamento di uno studio svolto per Fiorentina Gas SpA

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alabisio M., Sidri R., *Gestione archivio Anno Tipo*, ENEL CRTN, Milano 1985
- [2] Bargellini P., *Scoperta di Palazzo Vecchio*, Ed Vallecchi, 1982.
- [3] Capeluto I.G., 2005, *A methodology for the qualitative analysis of winds: natural ventilation as a strategy for improving the thermal comfort in open spaces*, Building and Environment, n.40, pp.175–181.
- [4] Cellai G., Grazzini G., Balocco C. *Confronto tra metodi di calcolo di pannelli radianti a pavimento*. 53°Congresso Nazionale ATI, Firenze 15-18 settembre 1998, Vol. I, pp.107-118.
- [5] Comini G., Nonino C., 1994, *Thermal analysis of floor heating panels*, Numerical Heat Transfer, Part A, n.26, pp.537-550.
- [6] Comsol Multiphysics 3.2a, COMSOL Reaction Engineering Lab, COMSOL (comsol.com)
- [7] Comune di Firenze, Direzione Cultura - Opificio delle Pietre Dure e Laboratori di Restauro di Firenze – Settore di Climatologia e Conservazione Preventiva, Comunicazione Privata, 2005.
- [8] Grazzini G., Balocco C. *Thermodynamic analysis of a floor heating panel*. Proceedings ECOS '98, Vol.II, pp. 1089-1096, 8-10 July 1998, Nancy, France.
- [9] Maruta E., Kanda M., Sato J., 1998, *Effects on surface roughness for wind pressure on glass and cladding of buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, n. 74/76, pp. 651–663
- [10] Muccini U. , *Il Salone dei Cinquecento in Palazzo Vecchio*, Ed Le Lettere 1990.
- [11] Tsai J.L., Tsuang B.J., 2005, *Aerodynamic roughness over an urban area and over two farmlands in a populated area as determined by wind profiles and surface energy flux measurements*, Agricultural and Forest Meteorology, n.132 , pp.154–170.
- [12] UNI 10346, 1993, *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Scambi di energia termica tra terreno ed edificio. Metodo di calcolo*.
- [13] UNI 10969, 2002, *Beni culturali - Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni*, 01/02/2002.
- [14] UNI CTI E02.01.304.0, *Analisi e valutazione delle condizioni ambientali, termiche igrometriche e luminose, per la conservazione dei beni di interesse storico ed artistico*, C.dA.Riscaldamento e Refrigerazione, n.4 aprile 1994, pp.475-486 - D.M. 10 maggio 2001, "Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e

sviluppo dei musei", Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Gazz. Uff. 19 ottobre 2004, Suppl. Ord. Serie Generale n.244.

- [15] UNI EN 13789, 2001, *Prestazione termica degli edifici – Coefficiente di perdita di calore per trasmissione – Metodo di calcolo*, Marzo 2001
- [16] UNI EN ISO 10077-1, 2002, *Prestazione termica di finestre, porte e chiusure - Calcolo della trasmittanza termica - Metodo semplificato.*
- [17] UNI 7357, 1991, *Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento degli edifici.*
- [18] UNI EN 13789, 2001, *Prestazione termica degli edifici - Coefficiente di perdita di calore per trasmissione - Metodo di calcolo*

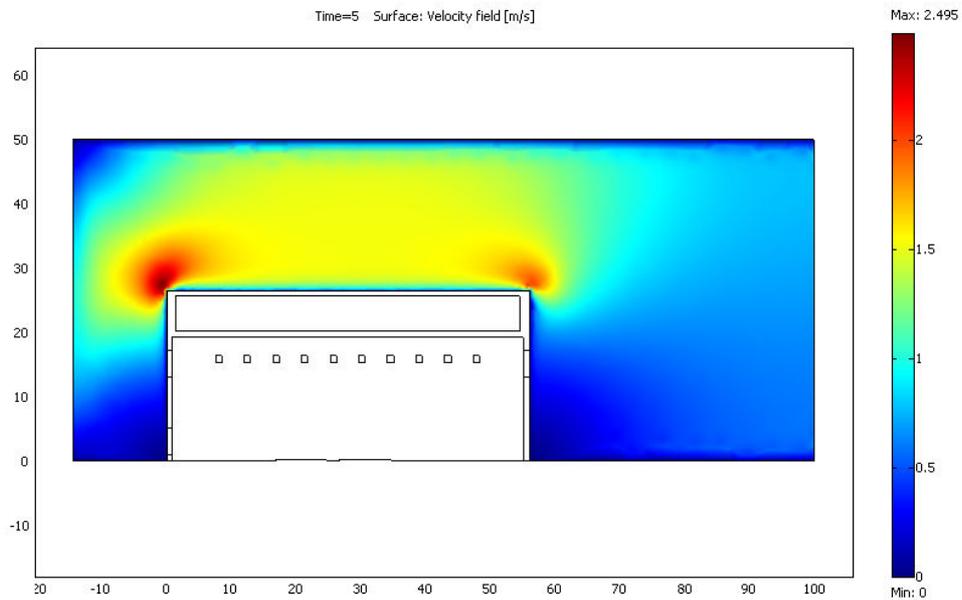


Figura 5. Campo di velocità volume di controllo per l' ambiente esterno (gennaio, ore 13)

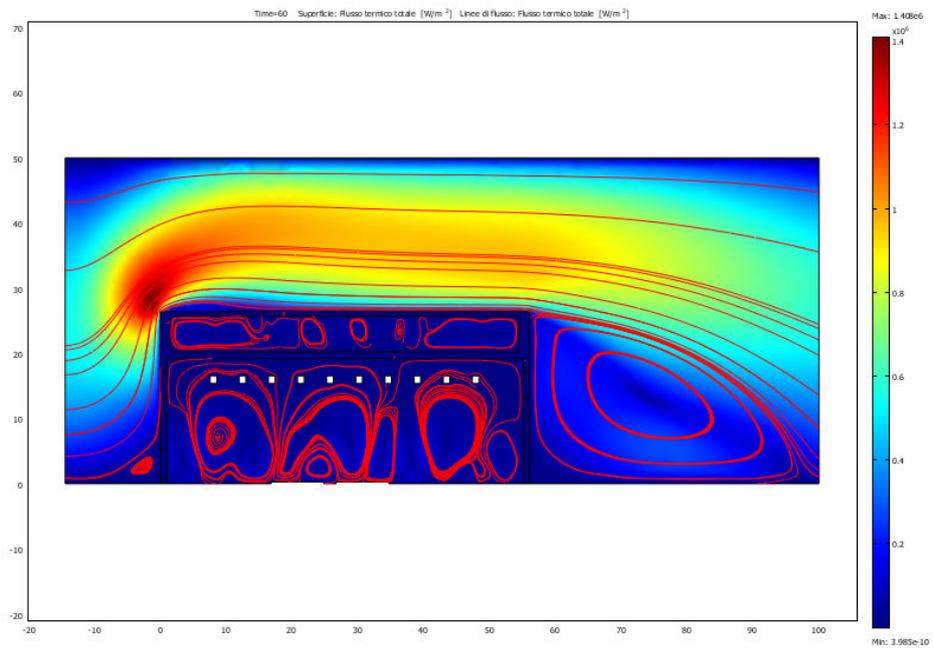


Figura 6. Campo di velocità per ambiente senza piastre radianti (gennaio, ore 13)

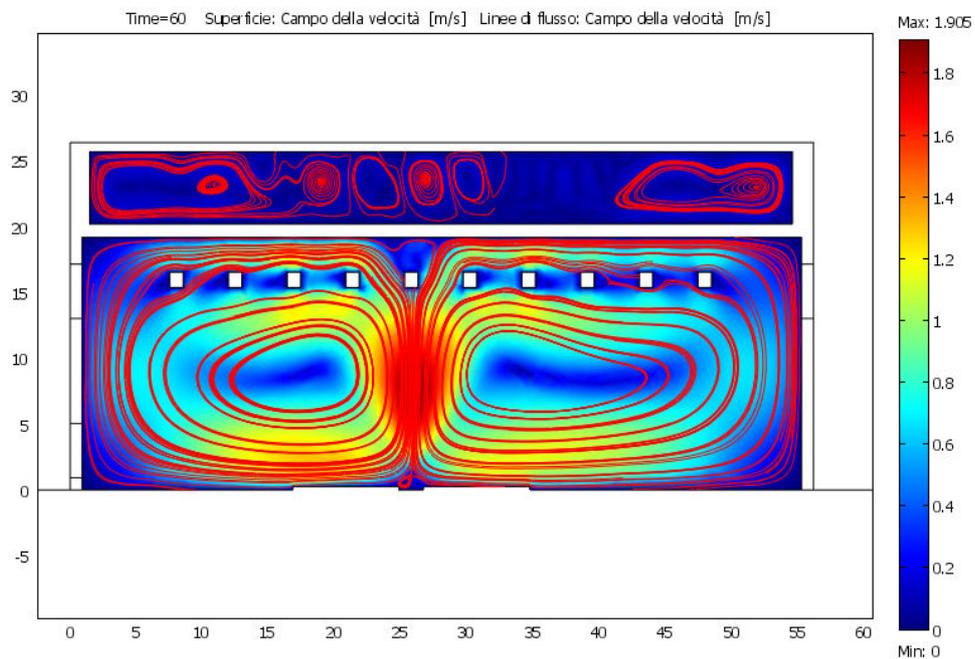


Figura 7. Campo di velocità per il solo volume interno con piastre radianti (gennaio, ore 13)

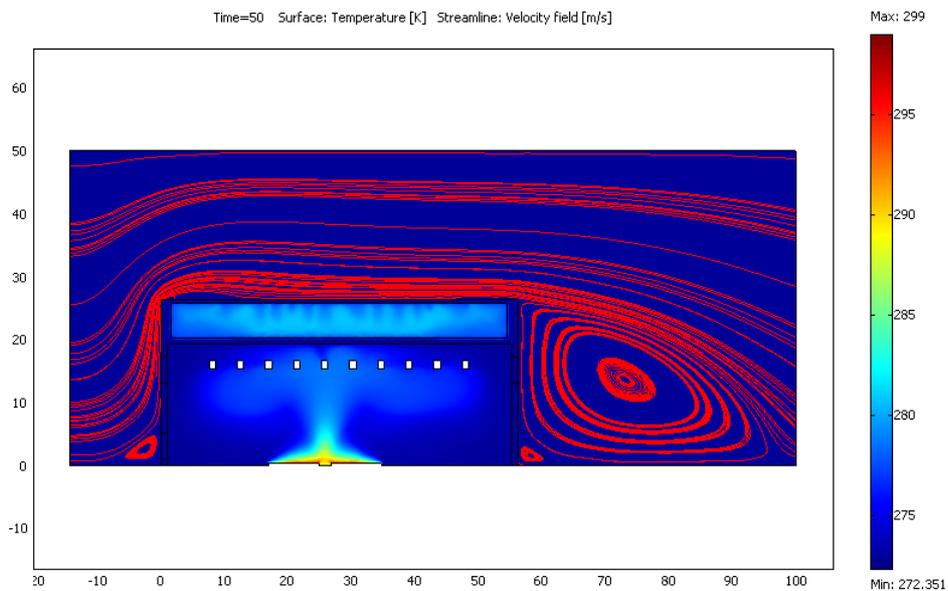


Figura 8. Distribuzione della temperatura per il solo volume interno con piastre radianti (gennaio, ore 13)

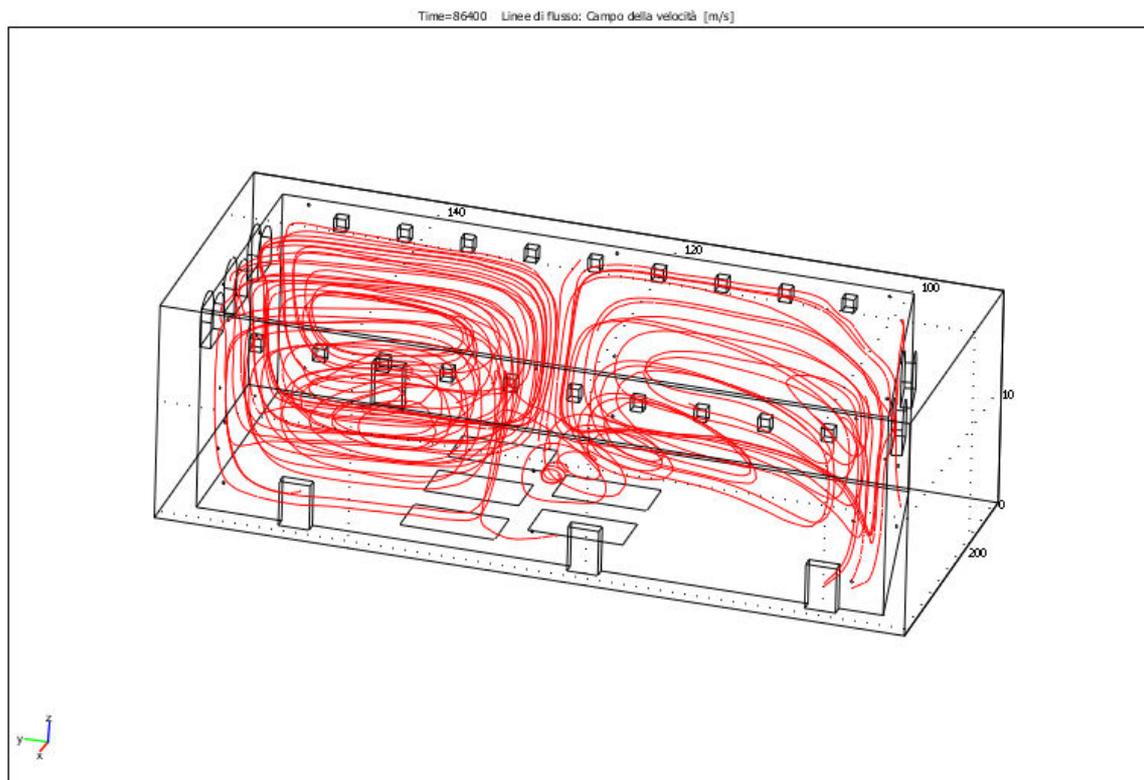


Figura 9. Campo di velocità per il solo volume interno con piastre radianti (gennaio, ore 13)