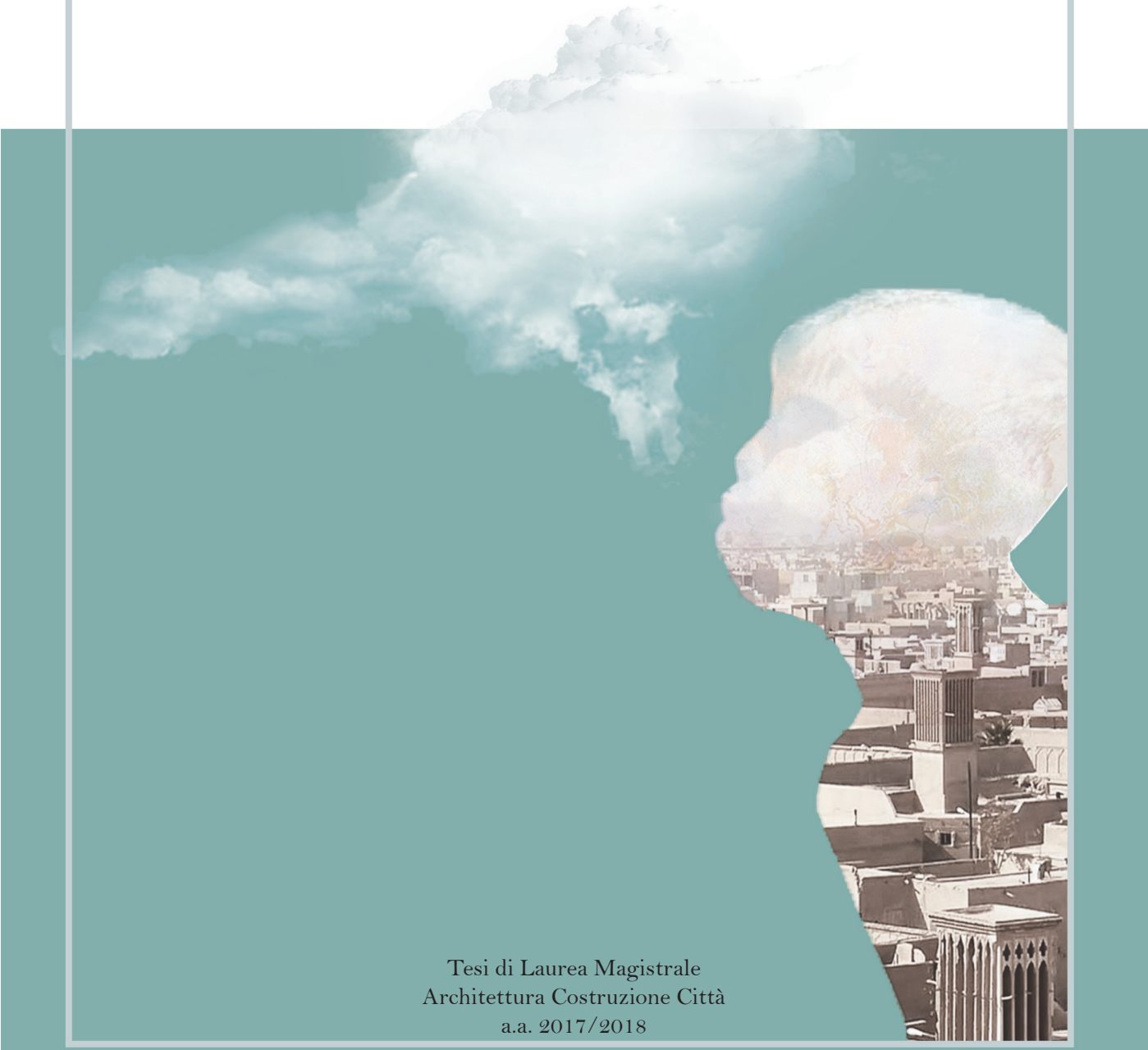
Le torri del vento:
lo studio del raffrescamento passivo per il progetto di un hammam a Yazd

Elisa Moro



Tesi di Laurea Magistrale
Architettura Costruzione Città
a.a. 2017/2018

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

Le torri del vento: lo studio del raffrescamento passivo per il progetto di un hammam a Yazd

Relatori
prof. **Marco Simonetti**
Alessio Dionigi Battistella
Francesca Olivieri

firma del relatore (dei relatori)
.....
.....
.....

Candidato
Elisa Moro
firma del candidato
.....

A.A. 2017/2018

Alla mia nonna,
brezza di ogni mattina.

Indice

Introduzione Pagina

Capitolo 1: **Iran** 17

1.1 Introduzione 19
1.2 Storia e architettura 19
1.3 Clima 30
1.4 Energie rinnovabili 32

Capitolo 2: **Progettare in clima caldo secco** 37

2.1 Linee guida 39
2.2 Expo Siviglia'92, Siviglia, Spagna 43
2.2.1 El Palenque
2.2.2 Avenida de Europa
2.2.3 Sfera Bioclimatica
2.3 Eso Hotel, Carro Paranal, Cile 45
2.4 Masdar city, Abu Dhabi, Emirati Arabi Uniti 45
2.4.1 Masdar City center
2.4.2 MasdarHeadquarters
2.5 King Abdullah International Gardens, Riad, Arabia Saudita 46
2.6 Samir Kassir square, Beirut, Libano 46
2.7 Mirage-like landmark for Middle East 48
2.8 Rigenerazione ecologica di Wadi Hanifa, Riad, Arabia Saudita 48

Capitolo 3: **Architettura tradizionale iraniana** 53

3.1 La città araba, persiana e islamica 55
3.2 Gli edifici pubblici: la mosche, la madersa e l'hammam 57
3.3 La sintesi tra cultura e ambiente 62
3.4 Sabat 62
3.5 Pirneshin 64
3.6 Khané 64
3.7 Ab-anbar 66
3.8 Yakhchal 68
3.9 Qanat 70
3.10 Bazaar 74
3.11 Caravanserraglio 76

3.12 Mashrabiyas 76

Capitolo 4: **Torri del vento** 81

4.1 Definizione 83
4.2 Funzionamento 83
4.3 Tipologie 85
4.4 Elementi 87
4.5 Materiali e struttura 89
4.6 Il patio verde 89
4.7 I badgir contro l'emergenza ambientale 90
4.8 Nuove soluzioni 91

Capitolo 5: **Yazd** 95

5.1 Introduzione geografica 97
5.2 Storia e achitettura della città 97
5.3 Il masterplan del '78 99
5.4 La città vecchia 101
5.5 Analisi urbana 106
5.6 Le problematiche 106
5.7 Analisi climatica 107
5.7.1 Diagramma di Olgyay
5.7.2 Diagramma di Givoni
5.7.3 Digramma delle Isopletas
5.7.4 Maschere d'ombra

Capitolo 6: **Il comfort e i sistemi di raffrescamento passivo** 117

6.1 Il microclima urbano 119
6.2 Il vento 120
6.3 Il comfort termico 123
6.4 I modelli stazonari 124
6.5 I modelli adattativi 126
6.6 Il raffrescamento passivo come necessità 128
6.7 Ventilazione e sistemi di raffrescmento passivo 129
6.7.1 Raffrescamento microclimatico
6.7.2 Raffrescamento geotermico
6.7.3 Raffrescamento evaporativo
6.7.4 Raffrescamento radiativo

6.8 Abaco della ventilazione #

Capitolo 7: **Analisi fluidodinamica** 143

7.1 Cenni di fluidodinamica 145
7.1.1 Il flusso (o portata)
7.1.2 Linee di flusso
7.1.3 Effetto Venturi
7.1.4 Numero di Reynolds
7.1.5 Perdite di carico
7.1.6 Coefficiente di pressione
7.2 La validazione 148
7.2.1 Riferimento sperimentale
7.2.2 Modello CFD
7.2.3 Confronto dei risultati

Capitolo 8: **Il progetto** 159

8.1 Introduzione 161
8.2 La scelta del lotto 166
8.3 Dalle terme romane agli hammam mediorientali 166
8.4 Descrizione di progetto 172
8.5 Strategie bioclimatiche 174
8.5.1 Il patio
8.5.2 Le cupole
8.5.3 L'ombreggiamento
8.5.4 Il giardino
8.6 La ventilazione 200
8.7 Il ciclo dell'acqua 202
8.8 Frigidarium: verifiche di fluidodinamica 204

Conclusione 207

Ringraziamenti 209

Introduzione

Le torri del vento, chiamate badgir nella lingua locale, sono il simbolo dell'architettura tradizionale persiana, presenti in ogni edificio, pubblico e privato, poiché sono in grado di catturare le brezze fresche dei venti e garantire il raffrescamento all'interno degli ambienti: spingono l'aria fresca all'interno degli edifici, mandano fuori quella calda e viziata e hanno la capacità di modificare la temperatura all'interno dell'edificio. I badgir sono la sintesi perfetta tra tradizione e sostenibilità, come affermano studi recenti, poiché sono in grado di raggiungere condizioni climatiche ottimali senza alcun tipo di spesa energetica.

Lo studio e la rivitalizzazione di questo elemento architettonico è di fondamentale importanza a seguito dei preoccupanti dati sui consumi elettrici dell'Iran e di tutti i paesi che presentano climi caldi, desertici o tropicali.
I consumi elettrici annuali dell'Iran ammontano a più di 200 miliardi di kW/h, di cui il 2% derivano dall'uso dei condizionatori elettrici.[1] Secondo i report sul surriscaldamento del pianeta, si prevede che le temperature aumenteranno anno dopo anno, intensificando così la domanda di sistemi di raffrescamento. Da qui deriva l'importanza di trovare un'alternativa valida ed sostenibile dal punto di vista ambientale ai moderni condizionatori elettrici.

L'obiettivo di questa tesi è studiare le torri del vento e in generale i fenomeni di raffrescamento naturale per tradurli in forma architettonica. Analizzare il

clima e il territorio, individuare il *genius loci* al fine di progettare un'architettura che segue il linguaggio del flusso del vento ed ottenere spazi di qualità culturale e fisica.

Lo studio parte dalla storia, dall'architettura e dal clima persiani; approfondisce cosa significhi progettare in climi caldo-secchi e stila una lista delle tipologie edilizie della cultura iraniana, analizzando in particolar modo il legame costante con il clima.
Con il quarto capitolo ci si immerge nel cuore dello studio: si presentano le torri del vento in ogni loro funzione, elemento e tipologia. Da qui si arriva all'analisi di Yazd, la città delle torri del vento, situata in mezzo a due deserti.
Il sesto e il settimo capitolo sono i più tecnici: viene esposto cosa significa parlare di comfort e conseguentemente di raffrescamento passivo. Al fine di ottenere risultati scientifici tangibili si è analizzato il comportamento di una torre del vento a doppio condotto con un software di fluidodinamica. Seguendo la ricerca del professor Montazeri dell'Università di Yazd[2] e ricreando gli stessi dati di partenza, abbiamo potuto confrontare i risultati ottenuti, validando così la veridicità delle prestazioni delle torri del vento.
A coronare la tesi c'è il progetto per un hammam nel centro storico di Yazd. La massiccia presenza di vuoti urbani è dimostrazione della lenta e continua decadenza del centro storico che tuttavia possiede un patrimonio architettonico, artistico e culturale unico. L'assenza di un hammam come fulcro capace di confrontarsi con la Moschea del Venerdì e il famoso complesso di Amir Chakhmaq è stata presa come occasione per mettere in pratica gli studi precedentemente elencati.
Un hammam non è solo uno spazio di benessere in cui ci si prende cura di se stessi e della propria salute, ma anche uno spazio sociale di aggregazione. Il complesso presenta 9 torri del vento, ognuna delle quali ha caratteristiche specifiche in base all'ambiente che serve.

In conclusione questa tesi vuole essere un viaggio nel passato per riappropriarci, nel presente, di quella conoscenza millenaria che ci offre soluzioni semplici e naturali per rispondere alle problematiche ambientali del mondo contemporaneo.

"Tra i ricordi c'è un racconto leggendario. Una città, i suoi colori e le sue arsure. Dei bambini seduti in cerchio su un prato in primavera…e una voce persasi prematuramente nel vento ormai qualche luna fa.
Lo sguardo è tremolante come l'aria incandescente, cammelli sonnolenti avanzano blandamente per la strada, senza fretta, c'è tempo.
Si aprono le dune e s'avvicina un'oasi.
Case rosse di terra, magnifiche torri del vento si stagliano nel cielo, azzurro…
Ci troviamo in Iran, nella città di Yazd.
In nessun altro luogo dell'Iran, come a Yazd, fuoco, acqua, terra e aria si fondono così armoniosamente tanto da essere parte integrante della sua architettura, come dimostrato da quanto già scritto. A dirla tutta nessun'altra città, forse, è così visceralmente iraniana…
Vedo, come se fosse davanti a me ora, le sue mani che crepitano, ondeggiano come ali, scorrono come fiumi, molleggiano come cammelli sotto il caldo del deserto.
Il racconto si riavvolge, siamo di nuovo a casa, è ancora primavera. Sorride la sua voce.
Noi, bambini, abbiamo visto Yazd con i suoi occhi. Gli occhi di un viaggiatore ormai impegnato su altre vie, ben oltre il cielo della sposa del deserto."

Giulia Gabriele, *Yazd la sposa del deserto*, 2010

Note:

1 Movahed, 2016
2 vedi Montazeri, 2008 e Montazeri, 2010

Capitolo 1

Iran

"L'Iran è un paese ricco di storia e di cultura che l'hanno reso cerniera tra mondo arabo e mondo asiatico. Nei secoli la dominazione straniera venne alternata da periodi di governo locale, anche se solo nel 1979 l'Iran divenne una repubblica islamica. Ciò che distingue la varie regioni è la geografia e il clima: la varietà ambientale di questo paese è sorprendente, si va da paesaggi montani, alle foreste, fino ad arrivare alle coste sul golfo persico e al deserto."

1.1Introduzione

"Nella nostra civiltà moderna, generalmente ben protetta dai capricci del clima o perfino dal contatto con la natura, siamo inclini a dimenticare la parte spesso decisiva che la natura ha avuto nei destini di popoli più di noi legati alla terra e all'ambiente immediatamente circostante."[1]

Persia è il nome greco per indicare la provincia dell'impero Achemenide nel quale vivevano i persiani, popolo di derivazione delle terre tra Eufrate e Gange. Il territorio della Persia si divide in Iran Maggiore e Iran Exterieur. Il primo comprende le aree di lingua e tradizione iraniche come l'Asia Centrale, la Transcaucasia, l'India nord-occidentale e la Mesopotamia. L'altopiano dell'Afganistan e Persia invece facevano parte del cosiddetto Iran Exterieur. Nella storia i confini dell'Iran sono quindi difficili da fissare.
Esistono però due storie: quella prima dell'Islam e quella dopo il suo avvento. Nessuna conquista, né quella di Alessandro Magno, né l'influenza ellenistica o occidentale, è alla pari di quella dell'Islam. Il passaggio dalla Persia preislamica a quella islamica non avvenne con l'introduzione della religione bensì più tardi, nel X secolo, quando nacque la letteratura persiana scritta in lingua araba. Dal VII secolo al X si parla di "arabi in Iran".

1.2 Storia e architettura

I più antichi ritrovamenti di questa civiltà risalgono a 7000 anni fa nelle parti centrali del paese dove è stata scoperta la civiltà di Jiroft, della quale dal 2001 si possiedono alcuni oggetti custoditi in un'antica tomba.
Nel 1800-1700 a.C. si colloca il popolo degli Ari, nomadi appartenenti al ceppo indoeuropeo, che penetrarono nel nord del paese conferendogli il nome di Iran.
Dalla metà del II millennio a.C. la parte centrale e occidentale del paese venne occupata dal popolo del Medi, tribù seminomadi indoeuropee di notevole forza militare, i cui re fecero erigere colossali fortezze. Il regno dei Medi durò fino al V secolo a.C. quando, a causa dell'eccessiva eterogeneità della popolazione, fu sconfitto dalla nascente potenza persiana.
Quella degli Achemenidi, la più audace tra le tribù persiane capeggiata da Ciro il Grande, nel VI secolo a.C. fondò un impero che si estendeva dalla Mesopotamia fino all'Asia centrale. Una delle cinque capitali dell'impero achemenide, Persepoli fu fondata da Dario come residenza dinastica nelle quali i grandi re tornavano per ritrovare il contatto con i sudditi. Qui palazzi, terrazze e tombe

simboleggiavano il potere e la potenza dell'impero persiano e delle antichissime figure mitologiche indo-iraniche. L'impero Achemenide si differenziò per gli inediti principi di diritti umani che abolivano la schiavitù. Tutti i palazzi dei re di Persia infatti furono costruiti da lavoratori pagati. La religione persiana era un raggruppamento di mitologie popolari ma a partire del VI secolo a. C. si diffuse lo Zoroastrismo, religione di tendenza monoteista caratterizzata dalla netta separazione tra Bene e Male e dall'attesa di una apocalisse.
L'impero di Ciro, Dario e suo figlio Serse, venne distrutto da Alessandro Magno nel 331 a.C. che fondò l'impero seleucide che comprendeva i territori della Mesopotamia, della Siria, della Persia e dell'Asia minore. Le truppe di Alessandro Magno saccheggiarono e diedero alle fiamme Persepoli di cui oggi rimangono solo poche tracce. L'impero seleucide governò il territorio iraniano fino al 150 a.C. quando Mitridate I, re dei parti nel nord della Persia, si espanse. Durante il periodo partico vi fu una riscoperta della cultura persiana a scapito di quella ellenistica, tuttavia l'impero rimaneva politicamente instabile a causa delle continue pressioni dell'Impero Romano.

Il 226 d.C. decretò l'inizio della Persia sassanide, stato fortemente centralizzato con una popolazione suddivisa in caste in cui lo Zoroastrismo divenne la religione ufficiale. Guerre e religione furono i punti di forza e di debolezza di questa dinastia che dall' VII secolo avviò guerra contro l'Impero romano d'Oriente.
Le prime rivolte arabe iniziarono nel 630-640 d.C. e con la fatidica battaglia di Nihavand del 642 gli arabi riuscirono a sconfiggere l'esercito sassanide. Solo però 9 anni più tardi uccisero l'imperatore Yazdgard III ed ebbe inizio la conquista islamica della Persia.
Per alcuni secoli l'Iran venne governato dalla dinastia Omayyade (661-750). L'impero arabo fu lo Stato più esteso mai visto sin ora: occupava tutta la Penisola Iberica, il fiume Indo fino alla punta meridionale della Penisola Araba. Gli Omayyadi assorbirono molto dai sistemi amministrativi persiano e bizantino e governarono la Persia per poco meno di un secolo con capitale Damasco.
La conquista araba fu determinante per l'Iran: furono erette le prime moschee, lo zoroastrismo perse terreno fino a confinarsi nell'attuale regione di Yazd e le feste del vecchio culto furono ridimensionate in funzione della nuova religione islamica.
Nel 750 a causa di dissensi riguardo alla visione politica e religiosa, prese piede la rivoluzione Abbaside, infatti la maggior parte della popolazione iraniana non era né araba né musulmana e per questo veniva discriminata. Questa ri-

linea del tempo

Storia della PERSIA

2500 a.C.

tribù dei MEDI

Popolo del Medi era una tribù di seminomadi indoeuropea di notevole forza militare, i cui re fecero erigere colossali fortezze.

popolo degli ARI

1800 a.C.

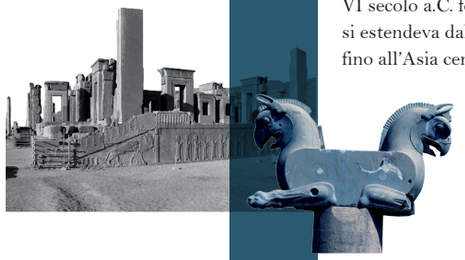
Penetrarono nel nord del paese conferendogli il nome di Iran.

2000
1500
1000
500

4000 a.C.

popolo degli ACHEMENIDI

Capeggiata da Ciro il Grande, nel VI secolo a.C. fondò un impero che si estendeva dalla Mesopotamia fino all'Asia centrale.



voluzione segnò di fatto la fine dell'impero arabo e l'inizio di uno Stato etnico. Se inizialmente l'Iran appariva aver accettato appieno le forme architettoniche islamiche, sebbene con materiali diversi, creando così uno stile Arabo-Iraniano, nel X secolo la dinastia locale dei Buyidi volle far riemergere la consapevolezza nazionale riportando in uso il persiano come lingua letteraria ufficiale. Nel IX secolo la dinastia indipendente locale assunse sempre più consenso e potere tanto che nel 1040 Seljuk Turks assunse definitivamente il controllo dell'Iran dando vita all'impero selgiuchide interetnico (arabo-turco-persiano). Esso comprendeva un'area vastissima dalle coste mediterranee della Turchia fino all'attuale Kazakistan e fu un grande impero medievale musulmano sunnita fino al XII secolo che portò alla nascita di nuovi ideali artistici rappresentati nei grandi monumenti dell'XI-XII secolo. I Selgiuchidi portarono nuova vita, energia e unione alla civiltà Islamica che in questa epoca si arricchì delle scoperte persiane in ambito astronomico e filosofico. Durante l'impero selgiuchide l'architettura assunse un carattere solido e tridimensionale: apparve per la prima volta la ormai caratteristica forma cilindrica del minareto, la pianta a iwan sia per le moschee che per le scuole, la esteriorizzazione degli elementi strutturali, le monumentali cupole e le decorazioni geometriche di mattoni. Tutte queste caratteristiche divennero poco a poco i caratteri essenziali della nazione iraniana. Già alla fine del XI secolo l'impero venne diviso in principati sempre più indipendenti finché nel XIII secolo l'Iran fu conquistato da Gengis Khan, capo dell'impero mongolo, che distrusse buona parte dell'architettura iraniana, interrompendone così lo sviluppo.
Il controllo dei Mongoli durò circa un secolo, poi Ghazan Khan, comandante a cui era affidata la regione iraniana, si convertì all'Islam e troncò i legami con l'impero. A questo punto l'architettura ricominciò a fiorire: le decorazioni vennero ridefinite e furono introdotti un gran numero di cromie nuove. La morte dell'ultimo khan nel 1335 determinò la fine dell'impero mongolo ed emersero ben presto dinastie locali come quella dei Muzaffaridi e dei Jalayridi. Tra il 1380 e il 1404 l'Iran fu soggetto ad un'altra devastante invasione mongola sotto il comando di Timur, che governò fino all'inizio del 1500.

Dal 1510 si stabilizzò la dinastia safavide che fece convertire definitivamente la maggior parte della popolazione all'Islam. Lo scià safavide Isma-il I fondò un nuovo impero persiano che includeva gli odierni Azerbaigian, Iran e Iraq, più gran parte dell'Afghanistan. La Persia safavide fu all'inizio uno Stato violento e caotico, ma negli ultimi decenni del XVI secolo ebbe inizio un rinascimento culturale e politico. In ambito architettonico da quest'epoca in poi

l'uso del colore e delle superfici mosaicate crebbe sempre di più, come si può ammirare in numerosissimi edifici di Isfahan, capitale dell'impero. Con i Safavidi la Persia fu rapidamente e profondamente sciitizzata e da allora divenne la più grande nazione sciita del mondo musulmano. L'elemento sciita divenne in breve tempo parte sostanziale della identità iranica, anche se contribuì a distanziarla dal resto della comunità musulmana sunnita.
Nel 1722 la Persia subì la prima invasione europea da parte dello zar russo Pietro il Grande, mentre gli Ottomani invadevano il confine occidentale del paese. Nel 1740 Nader Shah sconfisse le truppe nemiche e grazie a questa vittoria ottenne il controllo dello Stato, che visse un'altra breve stagione di indipendenza. Nel 1747 il suo impero non gli sopravvisse e il paese ricadde nell'anarchia e nella guerra civile.
L'Iran della seconda metà del secolo si divise tra varie dinastie locali e solo nel 1779 ritrovò la pace e la tranquillità sotto la dinastia turca Qajar che spostò la capitale a Teheran.

Con la Rivoluzione costituzionale del 1906 gli iraniani ottennero un parlamento e più ampie libertà politiche, tuttavia nel 1911 i costituzionalisti vennero repressi e sconfitti dalla corona, appoggiata dallo zar russo.
La Persia fu convolta nella prima guerra mondiale a causa della sua posizione strategica tra Impero Ottomano e colonie russo-britanniche.
Poiché l'Iran possiede un'architettura tradizionale profondamente legata al suo territorio, nel XX secolo iniziarono ad affiancarsi progetti in stile Internazionale ad altri invece più tradizionali, creando così un mix confuso che doveva essere risolto. In poco tempo l'aumento della popolazione, il boom economico e l'aspettativa di uno stile di vita più alto portarono alla richiesta di nuove tipologie edilizie che però i professionisti locali non erano in grado di offrire. Come risultato si cominciò a copiare e importare modelli abitativi stranieri che non rispecchiavano quindi l'identità e le climatiche locali.
Nel 1925 il comandante dell'esercito Reza Khan si autonominò scià e stabilì così l'inizio della dinastia Pahlavi. Egli applicò un'energica politica di modernizzazione del paese: cambiò il nome da Persia a Iran, potenziò le strutture amministrative e militari, iniziò una politica culturale filo occidentale e anticlericale.
Durante il periodo tra le due guerre (1918-1939) si formarono nuove scuole di architettura, gli studenti si aprirono all'occidente e i professionisti ricominciarono ad approcciarsi nuovamente alla tradizione. Con il nome di memar si identificano tutti i grandi progetti su vasta scala approvati dal governo il quel

1040

dinastia dei SELGIUCHIDI

Portarono nuova vita, energia e unione alla civiltà Islamica che in questa epoca si arricchì delle scoperte persiane.

1100

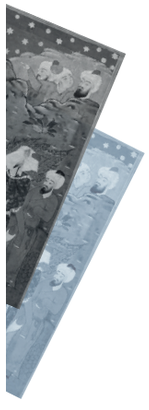
conquista di GENGIS KHAN

Il capo dell'impero mongolo distrusse buona parte dell'architettura iraniana, interrompendone così lo sviluppo.

1200

1300

1400



1500

dinastia SAFAVIDE

Con i Safavidi la Persia fu rapidamente e profondamente sciitizzata e da allora divenne la più grande nazione sciita del mondo musulmano.

1600

1ª invasione EUROPEA

Da parte dello zar russo Pietro il Grande, mentre gli Ottomani invadevano il confine occidentale del paese.

1700

periodo. In rinnovato stile nazionale iraniano degli anni '30 riportava in auge i grandi monumenti storici nazionali.
Il paese però rimase sotto l'influenza britannica e sovietica fino alla seconda guerra mondiale.
Durante i tre decenni seguenti la maggior parte dell'architettura nazionale si costruì per il basaz-o-beforush che significa "costruire per vendere".
A metà degli anni '60 alcuni architetti ricominciarono a seguire lo Stile Internazionale e a cercare un legame con l'architettura autoctona. Tra il 1965 e il 1978 si verificò una grande crescita edilizia che determinò la realizzazione di un gran numero di edifici pubblici. Fu proprio in questo clima che si realizzarono la Torre Shahyad di Hussein Amanat (1972) e il Teatro Municipale di Teheran di Ali Sardar-Afkhami (1968). L'architettura iraniana visse quindi un breve momento di gloria appena prima della rivoluzione del 1979, poi subì una decaduta che terminò solo tre decadi dopo.
La politica interna conobbe una stretta repressiva e antidemocratica, che portò al termine della dinastia nel 1979.
Sull'onda dell'entusiasmo popolare l'ayatollah Ruhollah Khomeini, il protagonista della rivoluzione islamica, prese il potere e approvò una nuova costituzione islamica basata sul principio del governo dei dotti dell'Islam. Nel 1979 venne proclamata la Repubblica Islamica che da subito attuò toni aggressivi sia verso i partiti di sinistra che verso il governo statunitense.
La rivoluzione del '79 non fu infatti solo una rivoluzione politica ma un drastico cambiamento dei valori della società. In ambito architettonico la rivoluzione determinò un periodo di caos e confusione nel quale si diede ascolto solo alla voce dei "nuovi ricchi" e, allo stesso tempo, si edificò come non mai nel paese. Il risultato fu un'architettura anarchica carente di qualità o identità.
Subito dopo la rivoluzione l'attenzione si spostò nelle aree rurali, si costruirono nuove infrastrutture come autostrade e una migliore rete elettrica, senza però coordinare il tutto con un piano urbanistico preciso. La seconda priorità fu quella di costruire nuove abitazioni popolari economiche, modificando l'assetto dei terreni confiscati durate la rivoluzione.
Gli anni '80 furono caratterizzati dal conflitto con il governo iracheno di Saddam Hussein (1980-87) che attaccò l'Iran anche con armi chimiche. La guerra tra Iran e Iraq che durò 8 anni, stremò la popolazione e devastò il paese. Alla morte dell'Imam Khomeini il suo posto venne preso da l'Ayatollah Ali Khamenei.
L'islamizzazione dell'architettura postrivoluzionaria diventò l'obbiettivo più importante. L'uso di materiali, tecniche e forme tradizionali soprattutto in

1800

1780

dinastia turca QAJAR

Pace e la tranquillità sotto la dinastia turca Qajar che spostò la capitale a Teheran.

1906

rivoluzione COSTITUZIONALE

Gli iraniani ottennero un parlamento e più ampie libertà politiche, tuttavia nel 1911 i costituzionalisti vennero repressi e sconfitti dalla corona.

1925

dinastia PAHLAVI

Applicò un'energica politica di modernizzazione del paese e iniziò una politica culturale filo occidentale e anticlericale.

1930

nuove scuole di ARCHITETTURA

Gli studenti si aprirono all'occidente e i professionisti ricominciarono ad approcciarsi nuovamente alla tradizione.

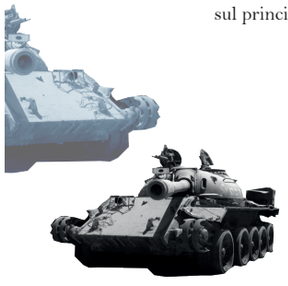
facciata rappresentano appieno quest'ideologia.
Le università rimasero chiuse per due anni per poter mettere in pratica la rivoluzione culturale e moltissimi intellettuali e professionisti lasciarono il paese.
L'architetto Hadi Mirmiran e altri iniziarono una nuova forma di intendere l'architettura locale, arricchendo il vocabolario locale e il discorso architettonico. Il suo complesso sportivo a Rafsanjan (1988) divenne ben presto un edificio iconico.
Mentre la ricerca di un'identità architettonica nazionale stava iniziando a dare i primi frutti, il paesaggio urbano stava cambiando drasticamente. Dai primi anni '50 le città iraniane subirono una crescita inaspettata e la speculazione del suolo nel mercato stava trasformando le periferie urbane. In dieci anni tutte le ville con giardino della capitale vennero sostituite con edifici alti, senza rispettare la dimensione del lotto e la capacità delle infrastrutture. Al tempo stesso la municipalità di Teheran approvò la conversione in parchi pubblici di tutti quei lotti troppo piccoli per la costruzione.

Agli inizi del XXI secolo l'Iran ha intrapreso la strada verso lo sviluppo energetico nucleare, seguendo la scia russa. Con la nuova presidenza di Mahmud Ahmadinejad, conservatore, si è accentuato il clima di astio verso gli USA, mantenendo truppe armate sul confini di Iraq e Afghanistan.
Con il cambio del secolo e la nuova generazione di architetti cominciò una fase più positiva improntata a creare spazi di più qualità e miglior estetica. Si organizzarono nuovi concorsi e premi, nonché conferenze, congressi e riviste che animarono il dibattito intellettuale. Sotto la presidenza di Mohamed Jatami (1998-2005) l'immagine dell'Iran cambiò secondo la politica del dialogo tra le civiltà. I concetti dell'architettura islamica iraniana venivano incorporati a progetti contemporanei adattati al contesto. Molti edifici storici vennero restaurati tant'è che intere aree di città furono riabilitate a nuova vita.
Attualmente la nuova identità dell'architettura iraniana punta a rappresentare la molteplicità e le sfaccettature del paese; infatti la principale caratteristica della cultura iraniana sta nella sua capacità di adattamento. Come si è visto, storicamente l'Iran è stato conquistato e governato da popoli di razza, lingua e religione diversa, che però si sono tradotte in una società unica.

Fig.1 (pagina adiacente) Linea del tempo della storia persiana. Produzione propria.

1960
boom ECONOMICO
La maggior parte dell'architettura nazionale si costruì per il basaz-o-beforush che significa "costruire per vendere".

1979
rivoluzione ISLAMICA
L'ayatollah Ruhollah Khomeini prese il potere e approvò una nuova costituzione islamica basata sul principio del governo dei dotti dell'Islam.



1980
conflitto con IRAQ
Saddam Hussein attaccò l'Iran anche con armi chimiche, la guerra durò 8 anni, stremò la popolazione e devastò il paese.

2000
sviluppo energetico NUCLEARE
Si è accentuato il clima di astio verso gli USA, mantenendo truppe armate sul confini di Iraq e Afghanistan.

1.3 Clima

L'Iran si trova in Medio Oriente ed è delimitato dal Golfo di Oman, la Golfo Persico e dal Mar Caspio, ha circa 78 milioni di abitanti[2] di cui un terzo vive nelle aree rurali e due terzi nelle città. Quasi la totalità del territorio iraniano è montuoso o desertico; il paese presenta un clima variabile in cui generalmente la stagione delle precipitazioni è da Ottobre ad Aprile.
Il territorio iraniano si può dividere in quattro aree climatiche:

a. Calda e secca, dell'altopiano centrale dell'Iran
b. Fredda e nevosa, del nord e ovest del paese
c. Calda e umida, a nord del Golfo Persico e sulle coste del Mar di Oman
d. Umida e piovosa, a sud sulle coste del Mar Caspio

Nella zona *a* non piove per sei mesi all'anno, il clima è desertico e gli elementi fondamentali per la vivibilità del posto sono l'acqua e il vento. Le caratteristiche principali del clima caldo-secco sono le estati calde e secchissime e gli inverni freddi, la bassa quantità di precipitazioni annuali, un'escursione termica fortissima e i black wind, venti carichi di sabbia del deserto. I mesi più caldi sono Maggio e Giugno con picchi fino a 50°C, mentre nel mese più freddo nelle aree a ovest, ai piedi delle montagne, si possono raggiungere i -20°C.
La zona *b* è montuosa e il clima freddo e la neve riducono le attività pubbliche durante il periodo invernale. Qui il sole e l'energia solare giocano un ruolo fondamentale, per questo le aperture sono più ampie. Il Yakhcal è un elemento cupolato della tradizione di questi territori. Esso è uno spazio dove si preserva il ghiaccio durante l'estate.
Nella zona *c* l'ombreggiamento e la ventilazione sono indispensabili soprattutto durante la primavera e l'estate. Tipici sono gli *ivaan*, sono grandi porticati molto profondi appoggiati alle facciate degli edifici per ombreggiare gli ambienti interni, esso funge da strato protettivo dell'edificio prevenendo la radiazione diretta. I *kapar* sono invece ripari provvisori di canne usati nelle aree rurali della regione. Essi mantengono un ambiente fresco, ombreggiato e ventilato.
La zona *d* raggiunge livelli d'umidità relativa all'80%; qui l'elemento architettonico più importante è il tetto che ha un'inclinazione particolare per il controllo delle precipitazioni; anche in quest'area vengono usati gli *ivaan* per la ventilazione e il raffrescamento.
Secondo la classificazione dei climi di Köppen, basata sulla crescita delle piante, l'Iran presenta 4 regioni climatiche: BWh, clima arido, desertico molto caldo con temperatura media annua ≥ 18°C; BWk, clima arido desertico con inverni molto freddi, BSh, clima steppico molto caldo con temperatura media annua ≥ 18°C; e infine BSk, clima steppico con inverni freddi.

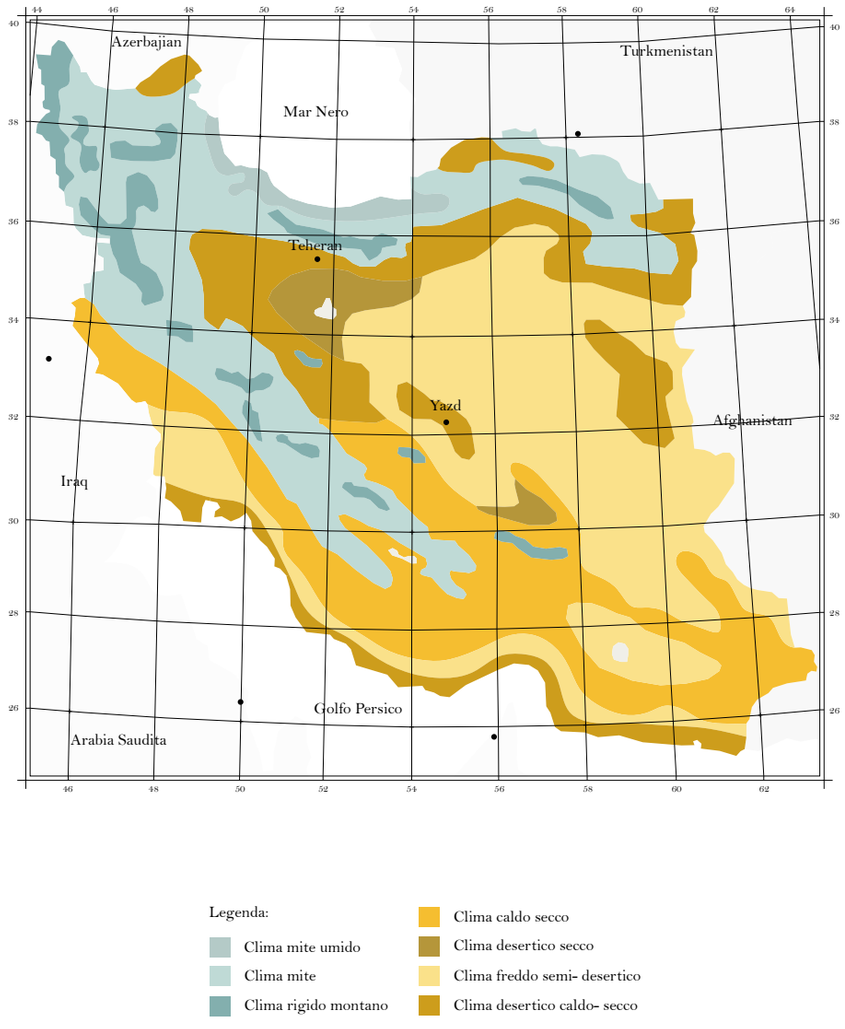
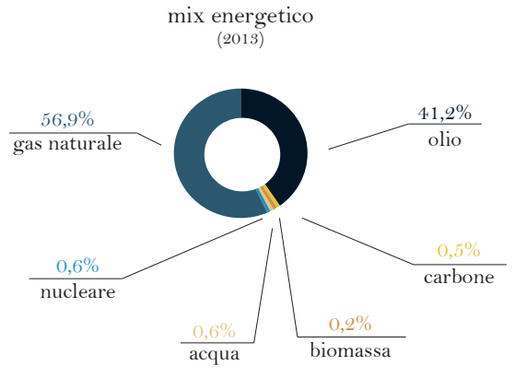


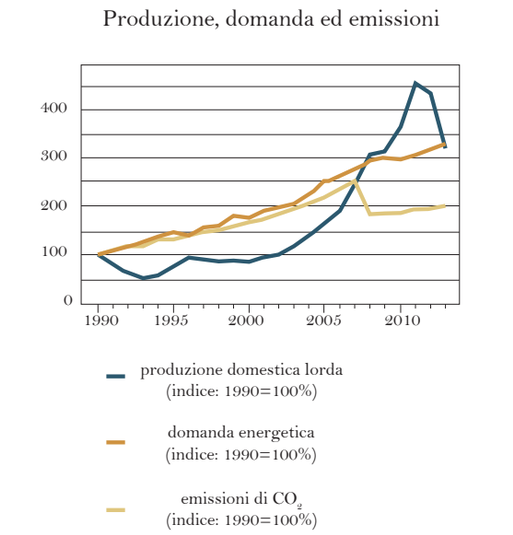
Fig.2 Mappa climatica dell'Iran. Produzione propria

1.4 Energie rinnovabili

Superficie: 1,6 milioni di Km² (6 volte l'Italia)
Età media: 27 anni
Popolazione: 80 milioni (100 milioni previsti nel 2050)
Tessuto urbanizzato: 1,9%
Popolazione che vive in città: 70%
Moneta: Rial iraniano
PIL: 409 miliardi (tasso di crescita +4,6% nel 2016)
Capacità energetica da fonti rinnovabili: 200 MW annuali

L'Iran è la 18ª potenza economica mondiale e la 2ª tra gli stati del MENA (Middle East and North Africa). È la 4ª riserva petrolifera al mondo e la 2ª per il gas naturale.[3]
Con il termine delle ingenti sanzioni economiche imposte dall'Unione Europea e il prezzo del petrolio sceso ai minimi storici, oggi il paese si dice pronto ad intraprendere una nuova politica economica incentrata sulle energie rinnovabili. Questa scelta, dice il ministro dell'energia Hamid Chitchian, mira ad attirare investitori stranieri, come la Germania, la Danimarca, l'Italia e la Spagna, e a impiegare i carburanti fossili solo per l'esportazione.
Potenzialmente l'Iran potrebbe coprire il 50% della domanda energetica con fonti rinnovabili, ma, senza un piano strategico mirato, per i prossimi decenni si potrà ottenere solo un 10%.[4]
Alì Mirmohammad, manager del settore sviluppo della Frost & Sullivan, sostiene che attraverso lo sviluppo del settore eolico, solare e della biomassa il paese può ottenere una capacità energetica di 4200 MW nel 2020, di 7000 MW nel 2024 e di 12000 MW nel 2030.[4]
Fino ad ora infatti, le sanzioni economiche che gravavano sul paese, non hanno permesso l'ammodernamento degli impianti, che risultano ormai poco efficienti e obsoleti. Dai dati ENI 2017 risulta che le vecchie centrali elettriche hanno bruciato circa 30 miliardi di dollari all'anno in carburanti fossili.
Le riforme proposte dal governo Iraniano concedono affitti di terreno a lungo termine a basso costo, contratti di garanzia per l'acquisto di elettricità da fonti rinnovabili, priorità agli acquisti di energia da privati e cooperative e prezzi d'acquisto di energia rinnovabile 10 volte più alti.
Il governo ha firmato contratti con privati per più di 2,8 miliardi di dollari per lo sviluppo di centrali eoliche, inoltre provvederà a sovvenzionare il 50%





indicatori energetici		media mondiale
consumi energetici	228.40 Mtoe	10
produzione di energia	298.93 Mtoe	9
esportazioni nette	55.78 Mtoe	
consumi energetici pro capite	2.95 toe/capite	
generazione di energia rinnovabile	15. 452 GWh	42

Fig.3 Dati provenienti da IEA, EIA, UNFCC, World Bank, Marzo 2016. Rielaborazione propria

degli investimenti per l'istallazione di impianti di fonti rinnovabili solari per uso domestico, scolastico e pubblico.

Note:

1 *Frye, 1967*

2 dati del 2012.

3 da Ambasciata d'Italia-*IRAN*

4 C. Diala-McBride, *Le Repubblica islamica delle rinnovabili*

Bibliografia:

R. Abouei, *Conservation of Badgirs and Qanats in Yazd*, Central Iran, The 23th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, PLEA, 2006

Ambasciata d'Italia-IRAN (a cura di), *IRAN*, Farnesina, InfoMercatiEsteri, in www.infomercatiesteri.it, consultato il 18/10/17

C. Diala-McBride, *Le Repubblica islamica delle rinnovabili*, in www.eniday.com, consultato il 18/10/17

J. Eiraji, S. A. Namdar, *Sustainable System in Iranian Traditional Architecture*, International Conference on green Buildings and Sustainable Cities, Iran, 2011

R. N. Frye, Q. Maffi, *La Persia preislamica*, Il saggiatore, Milano, 1967

A. B. Langroudi, *Breve storia dell'Iran*, Università di Roma-La Sapienza, 2013

M. Mahdavinejad, M. Ansari, S. Samadzadeh, S. Rafiei, K. Mousavi, F. Estakhr, *Contemporizing Valuable Urban Dstricts Regarding to Educating Environment Paradigms, case: Yazd, Iran*, 5th World Confeence on Educational Sciences – WCES, 2013

G. Michell, *Architecture of the Islamic World: Its History and Social Meaning, with a Complete Survey of Key Monuments*, Thames and Hudson, 1978

S. M. Moossavi, *Passive Cooling Systems for Hot-Arid Climate in Islamic Iranian Architecture*, International Conference on Islamic Arts and Architecture 5th Edition, New Delhi, 2011

K. Movahed, *Badgir (Wind Catcher) an Example of Traditional Sstainable Architecture for Clean Energy*, The 4th IEEE International Conference of Smart Energy Grid Engineering, Shiraz, 2016

F. Soflaee, M. Shokouhian, *Natural cooling systems in sustainable traditional architecture of Iran*, International Conference "Passive and low energy cooling for the built environment", Santorini, 2005

A. Petersen, *Dictionary of Islamic architecture*, Psychology Press, 1996

Capitolo 2

Progettare in clima caldo secco

"Progettare spazi aperti in clima caldo-secco è da sempre una sfida: disegnare e plasmare aree confortevoli significa saper lavorare in stretto contatto con il clima e il territorio. Oggi più che mai la progettazione sostenibile non è solo una possibilità ma un dovere nei confronti del nostro pianeta. Eccole linee guida e alcuni esempi progettuali in clima caldo-secco."

2.1 Linee guida

Molte regioni della terra possiedono condizioni climatiche esterne sufficientemente favorevoli per poter beneficiare degli spazi esterni e renderli parte della nostra vita. L'ambiente esterno e il suo ecosistema diventano parte integrante del lavoro, dei momenti di ozio e della rete di relazioni sociali che ci lega l'un l'altro.

Fin dai tempi più antichi gli spazi esterni erano il luogo delle relazioni sociali per eccellenza, basti pensare alle agorà greche, ai fori romani o alle movimentate piazzette medievali dove si intrecciavano le dinamiche della vita cittadina. In regioni a clima estremo, come nelle aree a clima desertico, tropicale o artico, tutto ciò incontra ostacoli molto più difficili da superare. Il clima agisce costantemente e inevitabilmente sul comfort dei suoi abitanti ed è fondamentale che si raggiungano livelli di benestare adeguati se si vuole innescare un processo di rivitalizzazione urbana e sociale.

In climi caldi non sempre è la temperatura la causa dell'assenza delle condizioni di comfort; in molti casi la temperatura esterna è minore della temperatura corporea ma, anche se è possibile eliminare il calore per convezione, la sensazione di disconfort è innegabile. Tutto questo è causato dalla radiazione solare che provoca surriscaldamento diretto, quando la radiazione colpisce direttamente l'individuo, indiretto, quando la radiazione riscalda le superfici circostanti, e diffuso dalla sfera celeste. In particolare quando i raggi solari colpiscono una superficie essi si riscaldano e cominciano a emettere raggi ad alta lunghezza d'onda che riscaldano a loro volta l'aria vicina per convezione.

Le strategie di disegno degli spazi esterni devono mirare a:
- Ridurre la radiazione solare diretta e riflessa;
- Favorire la presenza di vento fresco;
- Incorporare superfici fredde.

Il comfort si ottiene equilibrando il bilancio di perdite e guadagni di energia nell'individuo.
In climi caldi è molto difficile raggiungere livelli di comfort adeguati senza tener conto dell'evapotraspirazione, sebbene questa attività faccia diminuire liquidi e sali nel corpo. Si considera accettabile che la quantità di sudore non

superi gli 80 g/h, che corrispondono a un potere rinfrescante di 70 W. [1]
Le fonti di energia che si dovrebbero eliminare, o quantomeno ridurre, sono il calore generato dal metabolismo corporeo e la radiazione solare. Se il primo si può solo ridurre diminuendo le attività, ci deve essere un progetto chiaro e preciso per il controllo della radiazione solare.
Per evitare la radiazione diretta si deve aumentare l'ombreggiamento, un esempio comune è quello delle vie della medinas musulmana, ombreggiate quasi totalmente, aiutate dalla conformazione del tessuto urbano molto denso.
I materiali più idonei sono quelli con un basso coefficiente di riflessione, tuttavia solitamente essi presentano un alto coefficiente di assorbimento, il che significa che assorbiranno molto calore.

Fenomeno	Strategia basica	Strategia specifica
Radiazione solare diretta	ombreggiamento	protezioni solari
Radiazione solare riflessa dalle superfici circostanti	superfici a basso coefficiente di riflessione ombreggiamento	colori scuri acqua vegetazione protezioni solari
Radiazione solare diffusa dalla volta celeste	ombreggiamento	protezioni solari
Scambio di radiazioni a banda larga con le superfici calde circostanti	superfici a basso coefficiente di assorbimento ombreggiamento raffrescamento	colori chiari acqua vegetazione protezioni solari
Scambio per convezione con l'aria	ventilazione raffrescamento	beneficiare del vento con spazi appositi acqua
Perdite per lo scambio con la volta celeste	no ombreggiamento	protezioni solari mobili

Fig.1 Strategie bioclimatiche in clima caldo secco. Rielaborazione schema da Neila, 2014

Tessuti o plastiche chiari riflettono molto la radiazione solare e non si surriscaldano eccessivamente perché lasciano passare la radiazione. Tuttavia con l'invecchiamento o la sporcizia cominceranno a riscaldarsi di più, per questo è necessaria una manutenzione costante che mantenga le superfici pulite e fresche.

Nelle zone a clima caldo e secco il problema alla base della progettazione urbana è la mancanza della dinamicità della comunità e delle attività urbane causate da un clima per nulla tollerabile. In termini generici i principali problemi delle strade sono la radiazione solare, la pavimentazione inappropriata, le tempeste di sabbia e gli insufficienti servizi pubblici.
Alcune soluzioni per migliorare le condizioni delle aree urbane pubbliche possono essere:

-Utilizzo delle torri del vento in dimensioni minori alle fermate dei mezzi pubblici;
-Sostituzione degli spazi erbosi con piante grasse che necessitano di una minima quantità d'acqua;
-Riduzione delle superfici asfaltate e sostituzione con pavimentazioni che non assorbano la radiazione solare;
-Uso di materiali locali come i mattoni di fango e il legno;
-Progettazione di viali alberati sempreverdi come il pini e i tamarischi;
-Diffusione delle torri del vento e dei sabat come elementi simbolico-culturali;
-Design di aree pubbliche coperte e ventilate con badgir;
-Uso di colori chiari per le facciate;
-Orientamento delle strade in base ai venti;
-Dimensionamento delle strade in relazione all'altezza degli edifici.

Recenti studi sull'educazione ambientale affermano che per creare un buon spazio urbano è necessario dargli un'identità solida e predisposta ad interagire con i cittadini; deve contenere sia elementi della tradizione che innovativi per stabilire un dialogo tra le diverse generazioni; deve ispirare alle attività collettive e garantire uno sviluppo sostenibile, riflettendo le prospettive degli abitanti.

Fig.2 El Palenque. Foto di Raùl Doblado, dal sito evilla.abc.es, consultato il 2/2/18

Fig.3 Avenida de Europa. Foto dal sito fcarre.com, consultato il 2/2/18

2.2 Expo Siviglia'92, Siviglia, Spagna

2.2.1 El Palenque

Un esempio è El Palenque de José M. Prada Pool per l'Expo di Siviglia (Spagna) del 1992.
El Palenque è uno spazio pensato per gli spettacoli all'aperto, la struttura di acciaio sostiene una copertura bianca in PVC combinato a un sistema di irrigazione che permette di ridurre il riscaldamento della copertura di circa 7°C.
Ciò che ha la proprietà di assorbire e riflettere poco sono la vegetazione e gli specchi d'acqua. Le specie adeguate per ottenere un buon ombreggiamento e anche un ambiente più termicamente stabile, sono il castagno, il noce, il platano, la quercia e il tiglio. Molto utili sono i pergolati con copertura vegetale. La principale differenza tra superfici vegetali e non è che la vegetazione assorbe l'energia solare e la sfrutta nella produzione di biomassa o per l'autoregolazione termica mediante evapotraspirazione, e in questo modo non si surriscalda.
Un'alternativa valida sono le copertura a lamelle che ostacolano la radiazione diretta grazie all'inclinazione delle lamelle, con il vantaggio di permettere la fuoriuscita dell'aria calda ed evitare così la formazione di borse d'aria calda.
Se si vuole usare coperture continue è buona norma che abbiano una doppia pelle così che la pelle a contatto con i raggi solari possa far defluire il calore accumulato mediante ventilazione nella camera d'aria tra le due superfici.
La temperatura della pavimentazione è molto importante perché in contatto diretto con l'individuo. Una pavimentazione chiara si riscalda meno; le superfici vegetali sono sempre adatte soprattutto dove l'ombreggiamento è ridotto.
Lo stesso effetto si ottiene con fonti e superfici d'acqua.
Un albero evapora circa 500 kg di acqua al m2 e ciò significa che ha una potenza di raffrescamento pari a 39 W/m^2 che aiuta a rinfrescare tutto l'ambiente circostante.

2.2.2 Avenida de Europa

Altri elementi che aiutano il comfort esterno sono le tecniche di raffrescamento passivo, come quelle utilizzate per l'Expo del 1992 a Siviglia (Spagna) in Avenida de Europa. Qui sono state istallate torri evaporative che al loro interno facevano scendere l'aria fresca.

Fig.4 Avenida de Europa, Sfera bioclimatica. foto dal sito mapio.net, consultato il 2/2/18

2.2.3 Sfera Bioclimatica

La Esfera Bioclimatica, sempre all'Expo '92 è una sfera tonda che emette acqua vaporizzata e che crea un microclima piacevole nel suo intorno.

2. 3 Eso Hotel, Cerro Paranal, Cile
Auer+Weber Architetti,1998

Fig.5 Eso Hotel. Foto dal sito auer-weber.de, consultato il 2/2/18

L'ESO, European Southern Observatory, è un osservatorio telescopico e hotel per ricercatori che ha base nel deserto montagnoso del Cile. L'edificio ha lo scopo di riflettere la natura come contrasto all'alta tecnologia usata dai telescopi. In condizioni climatiche estreme a causa dell'elevata radiazione solare, la siccità e i forti venti creano le condizioni ideali per localizzare una base che possa considerarsi un'oasi di relax e tranquillità lontana dalla vita cittadina.

2.4 Masdar City, Abu Dhabi, Emirati Arabi Uniti

2.4.1 Masdar City Center
Norman Foster, Foster+Parteners, 2007

Il progetto vuole reinterpretare in maniera contemporanea le strategie bioclimatiche della cultura tradizionale araba. Si tratta di una città in mezzo al deserto, libera da qualsiasi emissione di CO_2.È la prima città moderna al mondo pensata senza ricorrere a veicoli alimentati ad energia fossile, disegnata affinché i punti d'accesso al trasporto pubblico non siano più lontani di 200

m da un qualsiasi punto della città. Masdar è energeticamente autosufficiente grazie all'utilizzo delle nuove tecnologie che si ispirano alla tradizione locale. La città si divide in settori sufficientemente ordinati e flessibili per potersi costruire poco a poco. La combinazione tra i sistemi di raffrescamento con torri eoliche, il nuovo sistema di trasporti sostenibile e la geometria urbana vuole essere un esempio per un nuovo tipo di urbanistica in tutto il golfo Persico.

2.4.2 Masdar Headquarters
Adrian Smith & Gordon Gill Architecture, 2008-10

La sede centrale di Masdar City è il primo edificio al mondo a grande scala e a uso misto a "energia positiva" poiché produrrà più energia del suo consumo. Inoltre non produrrà rifiuti né solidi né liquidi. Un elemento fondamentale dell'intero progetto è l'enorme copertura ondulata che presenta una vasta area con pannelli fotovoltaici. I coni di ventilazione contribuiscono alla climatizzazione e filtrano la luce naturale mentre tutti i materiali sono stati scelti con un'analisi del loro ciclo di vita.

2.5 King Abdullah International Gardens Riad, Arabia Saudita
Barton Willmore, 2008-11

Il progetto prevede la realizzazione di un giardino botanico interattivo capace di ospitare fino a 45 000 visitatori al giorno. Non si tratta di una collezione botanica tradizionale ma di una serie di reinterpretazioni degli ecosistemi esistenti in epoche passate in quest'area. L'intero progetto è a emissioni zero e prevede l'utilizzo dell'energia solare e della raccolta di acqua piovana per lo sviluppo e la funzione della struttura. La forma del complesso si rifà alla mezzaluna simbolo dell'Islam.

2.6 Samir Kassir square, Beirut, Libano
Vladimir Djurovic Landscape Architecture, 2004

La piazza Samir Kassir riprende lo stile minimalista tipico del suo progettista, si trova in un distretto centrale di Beirut in cui sono miracolosamente sopravvissuti alla guerra due enormi ficus, simbolo della comunità locale. L'obiettivo progettuale era quello di creare un'oasi tranquilla e serena in un'area ristretta e circondata da edifici e dalla strada. L'elemento padrone della piazza è lo specchio d'acqua sopraelevato e affiancato da una panchina in pietra lunga 20

Fig.6 King Abdullah International Gardens Riad, foto dal sito kaig.net, consultato il 14/11/17

Fig.7 Piazza Samir Kassir, foto dal sito desmena.com, consultato il 14/11/17

m. I riflessi dell'acqua, il suono della cascata e l'ombra dei ficus ti fanno scappare dalla realtà cittadina, pur rimanendone immersi.

2.7 Mirage-like Landmark for Middle East
Sou Fujimoto Architects, 2013

Lo studio di Sou Fujimoto realizzò un masterplan per un centro commerciale in una ancora città del Medio Oriente. Il progetto si trova tra un centro finanziario e uno per l'educazione e ha come intento quello di reinterpretare l'atmosfera vibrante dei mercati tradizionali islamici. Il risultato è una struttura modulare ad archi che crea giochi di luci e ombre, pieni e vuoti, che sintetizzano chiaramente i caratteri della tradizione architettonica islamica.

2.8 Rigenerazione ecologica di Wadi Hanifa, Riad, Arabia Saudita
Arriyadh Development Authority 2001-07

Collocato al centro dell'altopiano Najad in Arabia Saudita, la valle Wadi Hanifa è la più lunga e più importante e possiede un naturale bacino di drenaggio di circa 4 km che negli ultimi decenni si stava danneggiando a causa dei rifiuti presenti nelle acque. Per tutelare la vallata e gli abitanti della aree circostanti si è attuato un programma di bonifica dell'ambiente. Come primo passo si è adottato il sistema della fitodepurazione per la depurazione dell'acqua contaminata, che ha aiutato anche il recupero delle specie della flora e fauna locale che progressivamente erano scomparse. Progressivamente con un intervento sulla infrastruttura preesistente si è eliminato tutto ciò che contribuiva negativamente sull'ecosistema del fiume, costruendo alternative più sostenibili. Il progetto prevedeva una zona parking e una passeggiata pedonale che connette sei grandi parchi e tre laghi artificiali, per un totale di 120 km di percorsi nella natura. L'intervento prevede l'uso di materiali e sistemi costruttivi tradizionali.

Note:

1 Neila, 2004

Fig.8 Wadi Hanifa, foto dal sito akdn.com, consultato il 14/11/17

Fig.9 Wadi Hanifa, foto dal sito archnet.org. consultato il 14/11/17

Bibliografia:

A. Bandarabad, *Rethinking sustainable street design in hot arid zone cities*, Department of urban planning & design Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, 2009

G. Fernàndez, *Atlas arquitecturas del siglo XXI. Africa y Oriente Medio*, FUNDACIÓN BBVA, 2011

P. Jodidio, *Green: Architecture Now!*, Taschen, 2013

M. Mahdavinejad, M. Ansari, S. Samadzadeh, S. Rafiei, K. Mousavi, F. Estakhr, *Contemporizing Valuable Urban Dstricts Regarding to Educating Environment Paradigms, case: Yazd, Iran*, 5th World Confeence on Educational Sciences – WCES, 2013

F. J. Neila, *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*, 2004

Sitografia:

www.archdaily.com
www.desmena.com
www.fosterandpartners.com
www.divisare.com
www.akdn.org

Capitolo 3

Architettura tradizionale iraniana

"Le condizioni climatiche estreme non hanno impedito la nascita di un'architettura intensamente viva e ragionata. Essa più che mai racconta la storia del popolo, fatta di materiali e tecniche locali tramandate e perfezionate nel tempo. Dai qanat alle cupole, dal pirneshin fino agli khishkhan: un viaggio che parla di un'architettura in armonia con la natura."

3.1 La città araba, persiana e islamica

C'è una profonda distinzione tra città arabizzata e islamica, ma più di tutto tra città islamica e persiana.
La città araba è precedente a quella islamica e nasce dallo scalo commerciale: è spazio attrezzato e permanente per la produzione. Essa ha confini netti per essere protetta e deve poter essere girata attorno. Nella civiltà persiana, la città ha significato politico e palaziale, simile alla città minoica, sebbene la concezione spaziale della città sia intesa in modo opposto tra cittadini e tribù nomadi. I nomadi hanno una visione dello spazio simile ai marinai: esso è tutto ciò che intercorre tra il punto di partenza e quello d'arrivo. Tutto è riconducibile a una geometria polare. La visione cartesiana di un cittadino, invece, interpretala città come la somma di isolati tagliati perpendicolarmente dalle vie. Nell'islam la città araba e quella persiana si fondono e trovano una forma unitaria.

Dal significato spaziale di *horma*[1], aura, si forma l'intera struttura cittadina. *Horma* è aura urbana ma anche barriera concettuale o confine invalicabile. *Horma* può essere un semplice tappeto che identifica il confine della casa per le tribù nomadi, oppure il recinto della grande moschea de La Mecca al cui centro c'è la Kaaba, la pietra nera sacra.
Si capisce quindi che esistono vari gradi dimensionali: la prima coincide con l'influenza spaziale della città che non coincide necessariamente con le sue mura, la città infatti ha quasi sempre un anello al di fuori. Un esempio è la piazza del suq si posiziona in prossimità della porta delle mura e collega la città interna dalle aree agricole circostanti. Qui è il luogo del commercio degli scambi e della giustizia.
All'interno la città è intesa come unità di elementi differenziati e organizzati secondo una gerarchia che va dal pubblico al privato, dal generico allo specifico: è un "gradualità concatenata"[2].
I gradi dimensionali sono tre:
- aree pubbliche;
-aree semi-pubbliche;
-aree semi- private.
Le aree semi-pubbliche sono raggiungibili da chiunque ma di fatto solo una stretta cerchia le frequenta. Quella semi-private sono frequentate solo dagli abitanti del quartiere.

La viabilità innerva la città nella sua totalità e si divide in una rete stradale primaria, ash-sharì, e quella secondaria, ad-darb, che collega gli ingressi tra loro e gliingressi al centro città.
La strada principale, le porte delle mura, i suq, le fontane, la grande moschea, le zavia[3], le scuole coraniche[4] fanno parte delle aree completamente pubbliche.
F. Fusaro in "La città islamica" (1984) scrive:

"Le strade sono misurate sul bisogno di rapporti e scambi intensi, sulle necessità di protezione dal sole, sulle esigenze del traffico pedonale."

La complessità della forma urbana corrisponde alla complessità d'uso: il traffico si intreccia al commercio, all'artigianato e ai magazzini, agli alberghi e alle moschee. L'intreccio tra pubblico e privato è intrinsecamente presente nella struttura urbana che consente così la coesistenza di tranquillità e isolamento accanto ai luoghi di maggior traffico. Lo spazio stradale tende a chiudersi dall'alto sfruttando gli aggetti delle abitazioni che creano zone d'ombra e allo stesso tempo rendono il tessuto urbano più denso.

"Le coperture stradali, il tipo dei negozi, le fontane, gli ingressi dei servizi pubblici, gli improvvisi slarghi e strettoie, chicane, aggetti delle abitazioni ai primi piani, cupole e minareti, individuano ciascun settore della città. Possono confondere con la loro varietà l'ospite distratto, come ogni tipo di ordine che ancora non si comprende, ma agli occhi del cittadino formano un sistema di immagini, nodi, riferimenti che lo orienta senza equivoci nell'insieme urbano." [5]

Lo stretto legame tra aspetto urbano e religioso è immediatamente percepibile: gli edifici sono disposti in una sequenza non casuale che rispetta il percorso spirituale che va dall'edificio per l'insegnamento delle scienze religiose, fino alla moschea del Venerdì, nell'esatto centro cittadino.
La rete viaria principale si trova all'interno della cinta muraria e fa parte dello spazio definito e protetto della città. È il luogo degli scambi e degli incontri. Le vie principali possono apparire anguste e tortuose perché il percorso propone continui cambi degli scorci prospettici, di luci e ombre, di prospetti che vibrano la luce a seconda dell'esposizione, e dei dettagli che determinano una molteplicità di allineamenti minimamente percettibili. Un'eterogeneità di materiali, tecnologie costruttive, colori e finiture conferiscono ad ogni tratto urbano un carattere unico e suggestivo. Il ritmico alternarsi di zone luminose e buie crea sconcerto agli occhi dei visitatori.

Delle aree semi-pubbliche fanno parte le strade secondarie, i masjid[6], i marabù, l'hammam e il forno. I quartieri hanno spesso organizzazione tribale, poiché risiedono famiglie discendenti da una stessa tribù. I marabù infatti è il luogo di sepoltura dei santi uomini della tribù del quartiere.
Si parla di spazi semi-privati per identificare sia aree come il derb, cioè il vicolo cieco che sia affaccia sulle strade secondarie, sia l'insieme delle famiglie che abitano il vicolo.

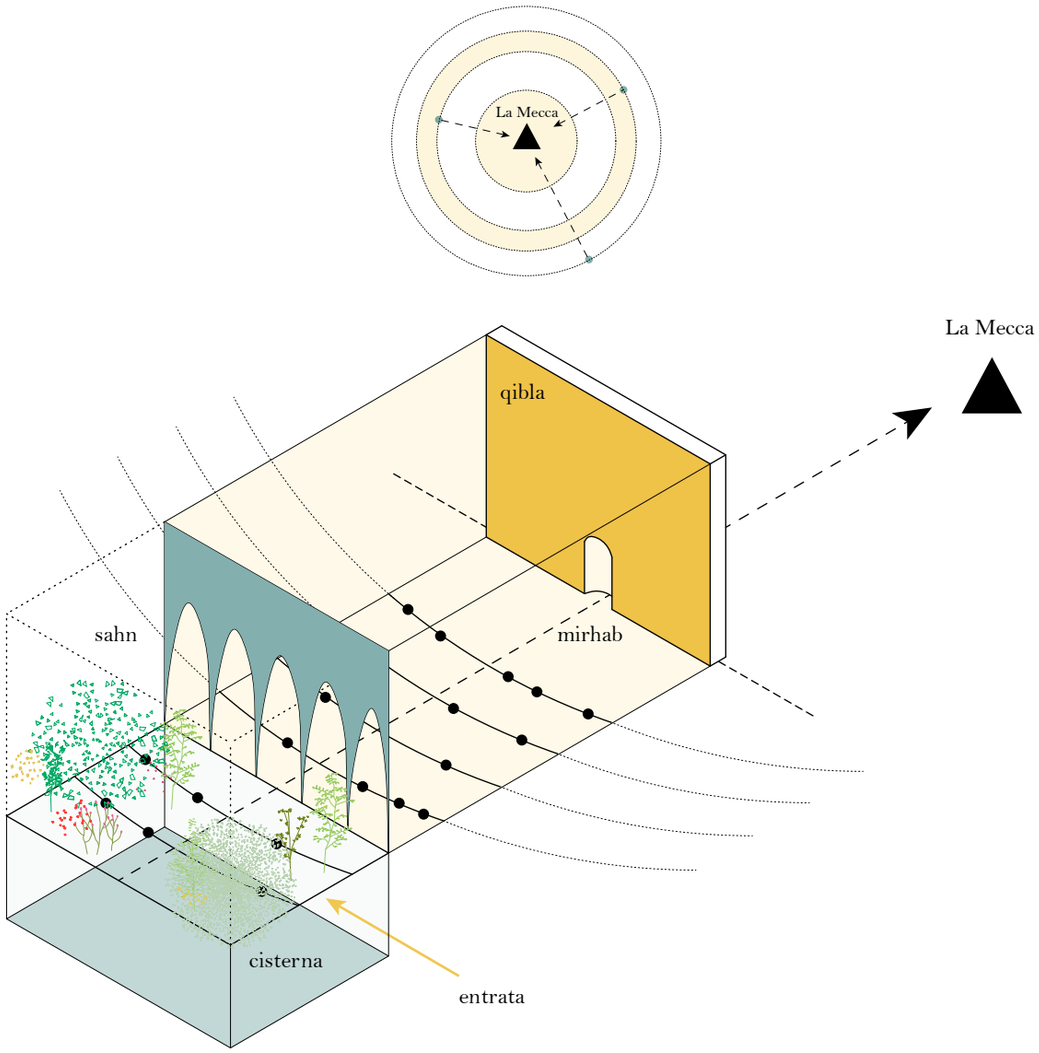
3.2 Gli edifici pubblici: la moschea, la medersa e l'hammam

La *moschea* non è necessariamente un edificio, è più strettamente il luogo in cui si prega. La moschea è più propriamente una direzione che punta verso la Kaaba a La Mecca. Questa polarità comporta circolarità: tutti i fedeli si dispongono in cerchio verso il polo. Il mondo intero è descritto secondo la radialità concentrica che si genera secondo questa logica. Da qui si spiega come la moschea non sia un oggetto ma un concetto, un incrocio tra assi e direzioni. Gli elementi architettonici che traducono il tipo concettuali sono la qibla, muro perpendicolare alla direzione de La Mecca, la nicchia del mihrab, che identifica l'intersezione tra la qibla e il raggio dalla Kaaba, le navate disposte parallelamente alla qibla cioè sugli ipotetici cerchi concentrici. La navata ortogonale alla qibla è l'identificazione del raggio che congiunge la comunità di fedeli a La Mecca. Solitamente la sala di preghiera si affaccia su una corte che funge da spazio intermedio tra spazio sacro e pubblico. La corte è il prolungamento dell'interno e mantiene tutte la caratteristiche della sala. Sotto la corte si trovano grandi cisterne per la racconta dell'acqua: la moschea non è solo il centro religioso ma il centro della vita sociale. Nella corte, chiamata sahn, è presente anche un osservatorio astronomico, infatti gli orari della preghiera si basano sull'orario astronomico. L'ingresso è sul lato minore della corte per immettersi direttamente in uno dei cerchi concentrici. Il minareto è un elemento subentrato secondariamente nel complesso della moschea tuttavia ricopre ruoli fondamentali per la comunità musulmana. È la torre di segnalazione vocale e visiva, simbolo della scuola di teologia e indice di rifugio religioso.
La moschea, oltre ad essere luogo di culto, è anche uno spazio laico di insegnamento e di studio, è una biblioteca pubblica.

La *medersa* è il complesso degli alloggi per gli studenti della moschea, possiede una sala di preghiera, la mensa e funziona come un moderno collegio univer-

sitario.

L'*hammam* è il corrispettivo arabo delle terme romane. A differenza dell'apparato romano l'hammam presenta vasche di minor dimensione per evitare lo spreco d'acqua, e la netta separazione dei sessi, imposta dalla rigorosa morale islamica.[7] L'hammam rimane una delle tipologie che meglio unisce rapporti ambientali, sociali e di economia sostenibile.[8]



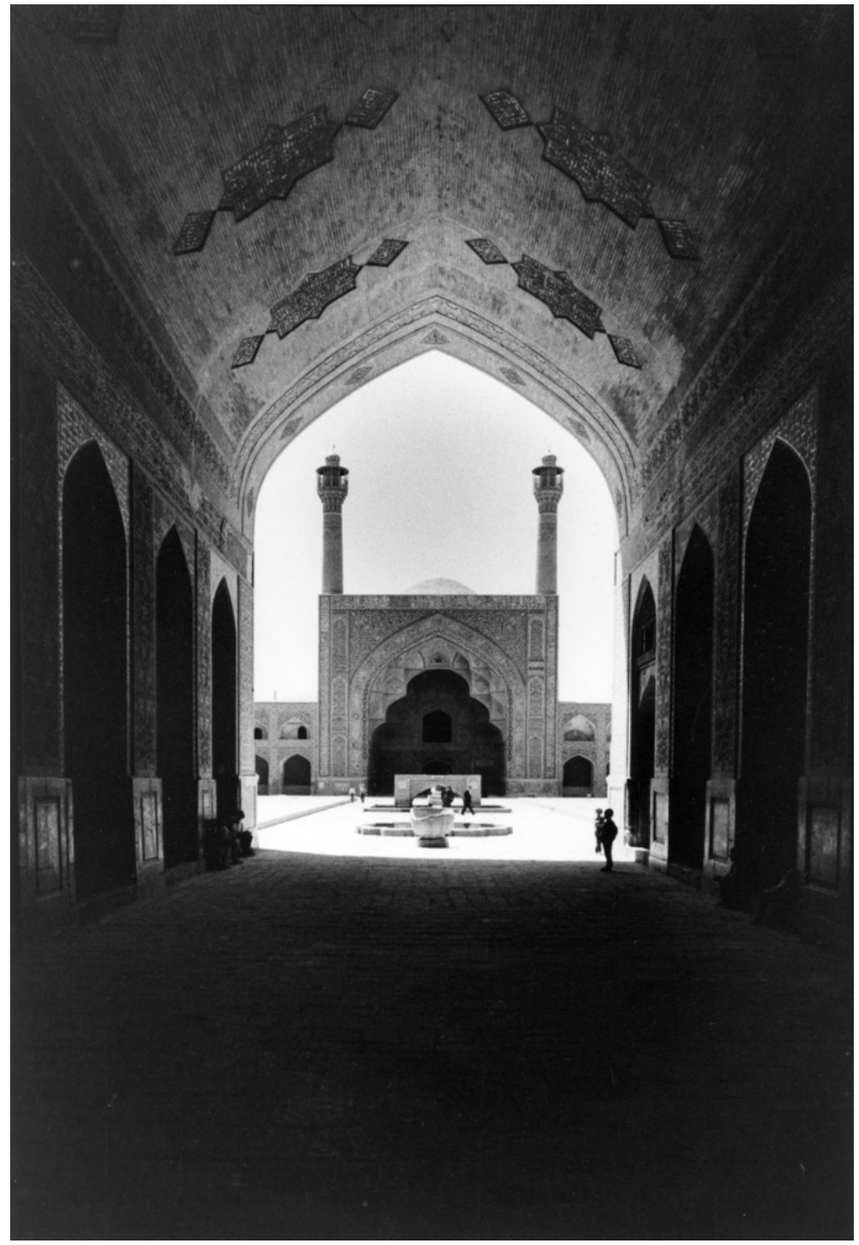
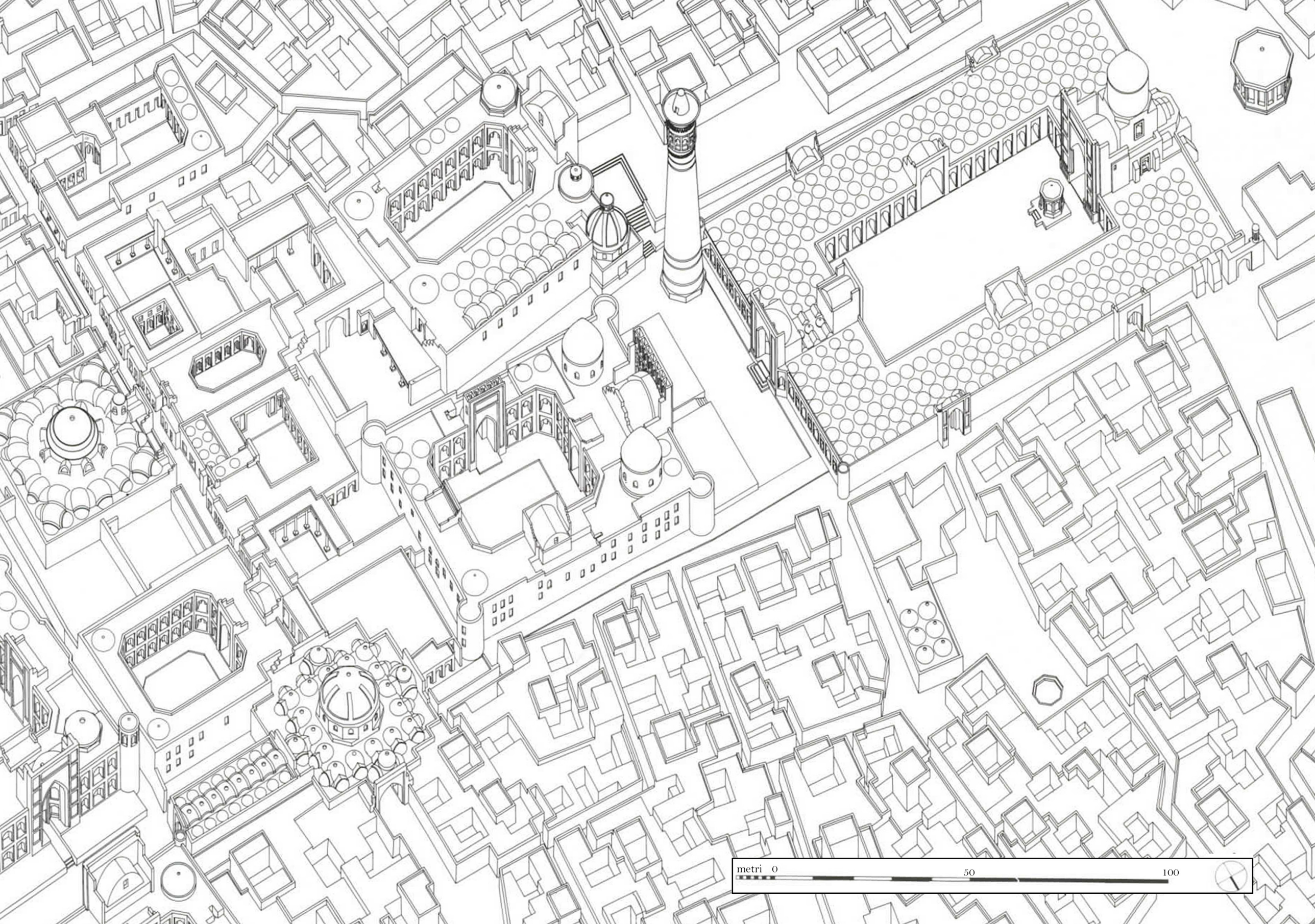


Fig.1 Schema della geometria alla base della Moschea. Produzione propria.
Fig. 2 (pagina a lato) Moschea di Isfahan, foto di Gabriele Basilico, www.humboldtbooks.com**, consultato il 9/2/18**
Fig.3 (pagine successive) Assonometria degli edifici pubblici all'interno del tessuto urbano, K. Herdeg, 1990


metri 0
50
100

3.3 La sintesi tra cultura e ambiente

Da sempre si adottano soluzioni contro l'elevata radiazione solare aumentando le superfici in ombra, creando un tessuto urbano compatto e orientando le vie in modo da essere in ombra durante il pomeriggio e allo stesso tempo in modo da portare i venti freschi al cuore della città. Inoltre le tempeste di sabbia possono essere ostacolate da filari alberati. Gli elementi per il raffrescamento passivo nell'architettura iraniana sono molteplici e a scale diverse, a partire da quella urbana sino all'individuazione dei materiali costruttivi più opportuni.
A scala urbana il denso tessuto cittadino permette di incanalare i venti freschi secondo direzioni prestabilite. La presenza costante di piazze serve a diminuire l'effetto dei venti caldi e sabbiosi.
La città islamica è un edificio-villaggio, un'unità di abitazione orizzontale servita da corridoi interni più che da strade. I metodi per ombreggiare le vie sono molteplici in tutti i paesi islamici e vanno dalle stuoie di canne o foglie di palma (Fez), alle grate di legno (Qairawàn) o di ferro (Marrakesh), ai tetti piani in legno (il Cairo), alle volte a botte (Tunisi) e alle piccole cupole allineate (Isfahàn). Ad assolvere alla funzione di ombreggiamento l'architettura iraniana possiede, oltre alle torri del vento, i sabat, i pirneshin e i mercati coperti (bazaar).

3.4 Sabat

Descrizione
I sabat sono vie pedonali strette sormontate da costoloni in sequenza ad arco a sesto acuto che vanno da un edificio all'altro creando così ombreggiamento e protezione dalle tempeste di sabbia. Questa struttura aumenta anche il senso di comunità tra i cittadini.

Localizzazione
Tutte le stradine nel centro città sono caratterizzate dalla presenza dei sabat e questo assicura un tessuto urbano molto compatto e omogeneo.

Funzionamento
Gli archi, distribuiti in modo omogeneo a circa un metro di distanza, ombreggiano il passaggio sottostante permettendo però alle brezze fresche di passare attraverso.

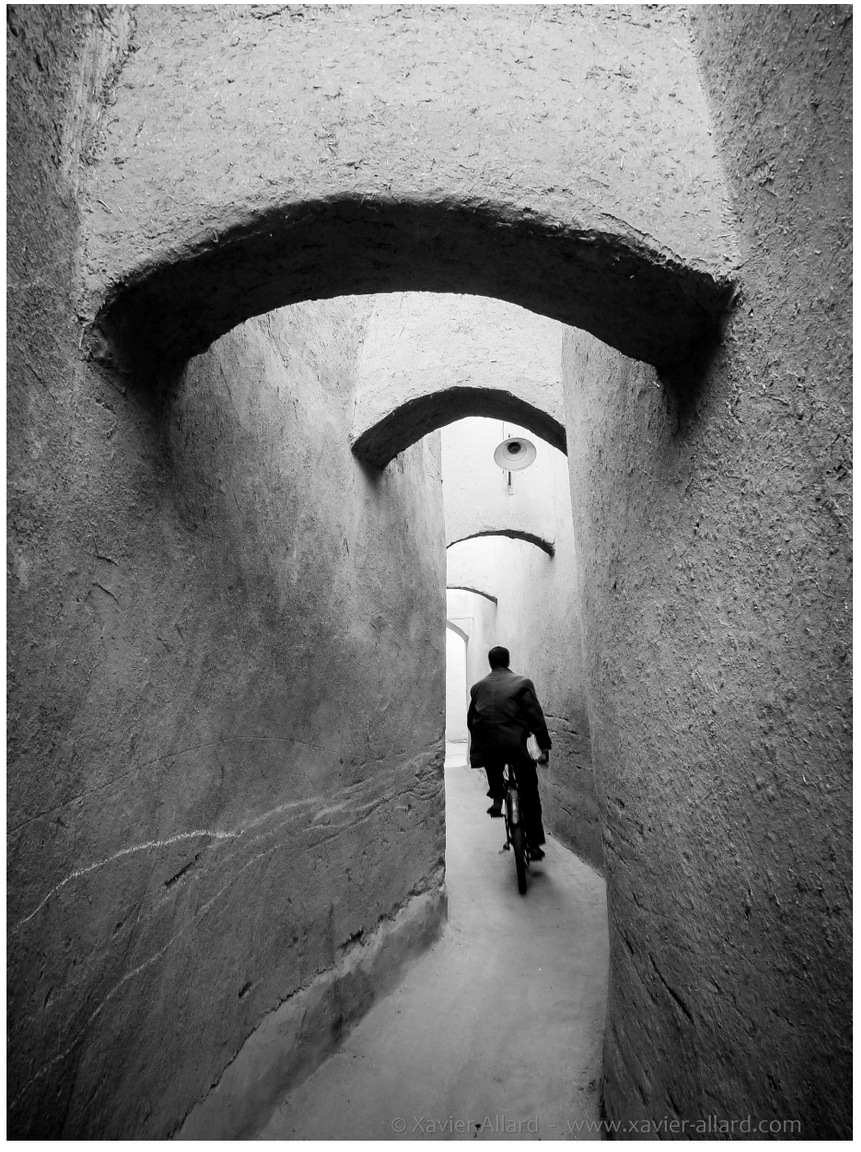


Fig.4 Sabat, Yazd. Foto di Xavier Allard dal sito xavier-allard.com, consultato il 14/11/17

3.5 Pirneshin

Descrizione
I pirneshin è uno spazio semipubblico coperto all'entrata delle abitazioni nel quale ci si può sedere e chiacchierare. Questo elemento crea un gradiente tra gli ambienti abitativi e la strada e quindi rappresenta in pieno la concezione iraniana e islamica di estrema divisione degli spazi e dei livelli di privacy.

Localizzazione
Usualmente i pirneshin si trovano all'ingresso principale delle abitazioni caratteristiche iraniane. Tutte le aperture degli edifici tradizionali però presentano un aggetto molto profondo rappresentata dallo spessore del muro.

Funzionamento
Con questo stratagemma si ottiene un'area ombrosa e raccolta appena prima dell'ingresso: questo impedisce ai raggi solari di penetrare direttamente negli spazi interni e quindi favorisce il mantenimento di un clima più fresco e confortevole.

3.6 Khanè

Descrizione
Il khanè è la casa tradizionale iraniana. Essa si sviluppa attorno al giardino interno, hayat-eMarkazi, che contiene diversi elementi indispensabili per il comfort come la vegetazione, per ombreggiare gli ambienti interni, le vasche d'acqua che aiutano a umidificare l'aria e alti muri per direzionare la ventilazione.
In alcune residenze è presente anche una corte interna a livello del basamento, chiamata Godal Baghcheh, che permette di avere accesso all'acqua proveniente dal qanat. Il basamento diventa il luogo più fresco della casa tanto che in passato lo si usava per conservare il cibo.
Lo shabestan è uno spazio tra la parte più bassa del badgir e il qanat, questa stanza gode di un'ottima ventilazione ed è perfetta per le giornate estive più torride.
La struttura è realizzata con un sistema in legno sia par le pareti che per il basamento e la copertura. Al di sopra dello strato strutturale si trova uno di terra cruda per un totale di 35 cm di spessore totale delle pareti.

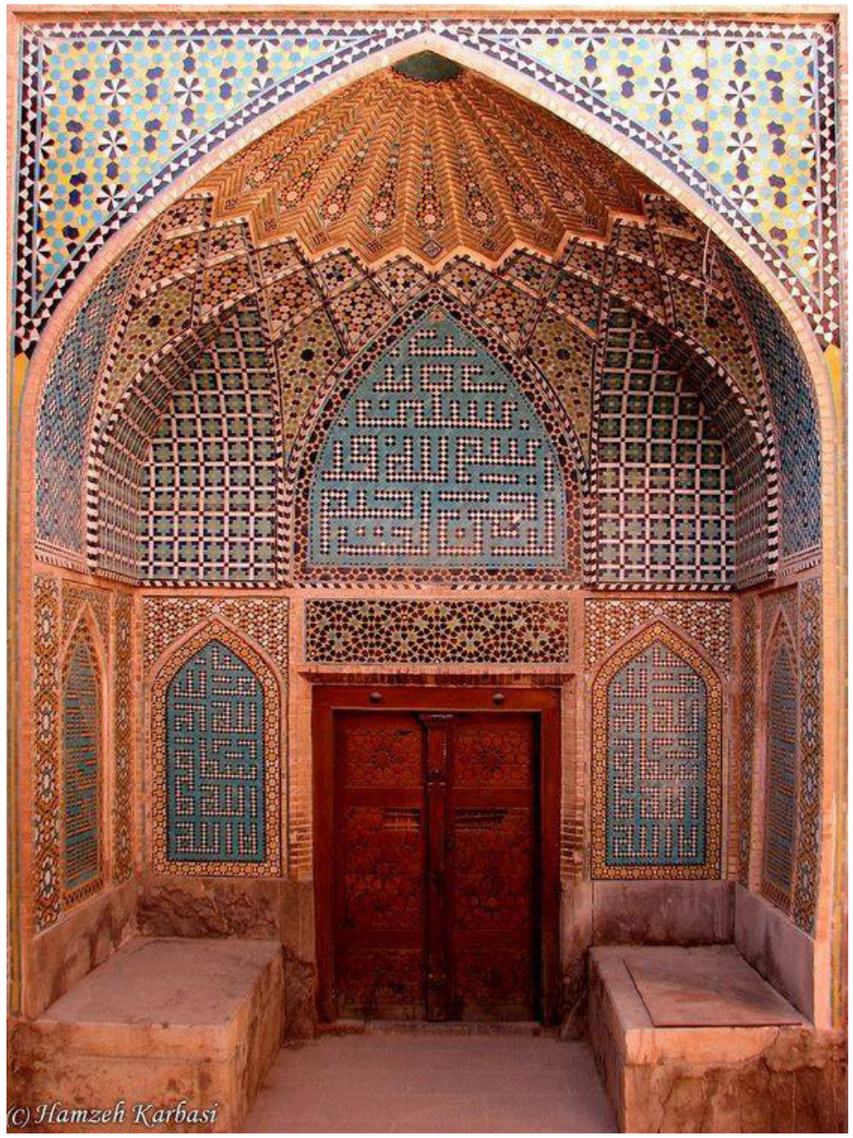


Fig.5 Pirneshin. Foto dal sito pinterest.com, consultato il 9/9/17

Localizzazione
Tutte le abitazioni tradizionali iraniane possiedono la maggior parte delle caratteristiche descritte, a seconda della classe e livello sociale le dimensioni del patio e il numero delle stanze variano.

Funzionamento
Il cortile interno è il vero cuore dell'abitazione, rappresenta l'entità intorno alla quale si evolve la vita sociale della famiglia. Il patio inoltre è un elemento di passaggio e distribuzione alle varie parti della casa.
Il piano terra è la zona più pubblica a cui si accede tramite l'ingresso principale che mira sempre ad avere elementi che gli conferiscono privacy. Il primo piano è una zona ad alto livello di privacy, in cui ci sono le camere da letto disposte intorno alla galleria che affaccia sul cortile interno.
La casa è divisa in parte estiva nesar e parte invernale panah. Il nesar si trova sul lato nord dell'edificio cosicché l'effetto della radiazione solare sia minimo e per questo anche le aperture sono ridotte. Qui ci sono le torri del vento e, per migliorare ulteriormente le condizioni climatiche, ci sono anche gli eivan e i ravaq, spazi semi-aperti porticati da cui si può accedere alle sale della casa. La parte invernale è orientata a sud, non presenta elementi per la ventilazione e le aperture sono più grandi per agevolare l'entrata dei raggi solari. Le finestre presentano infissi in legno e vetri colorati ampiamente decorati secondo la tradizione iraniana; quelle che si apro verso l'esterno sono scarse, di piccole dimensioni e presentano elementi aggettanti che le proteggono dalla radiazione diretta. Quelle verso il patio sono più numerose e più ampie.
Sulla costa, in clima caldo umido, sono tipiche le showadan, stanze a 6 o 7 metri al di sotto del piano del basamento a cui si accede tramite una nicchia del cortile interno. Queste stanze mantengono costante la temperatura di 25°C in tutto l'anno, presentano condotti verticali per l'illuminazione chiamati sisara o dozbarreh e sono dotati di uno sfiato per la ventilazione. A volte le showadan di edifici vicini sono collegate tra loro attraverso tunnel sotterranei che sono frequentemente usati in periodo di guerra.

3.7 Ab-anbar

Descrizione
Gli ab-anbar sono le cisterne per l'approvvigionamento pubblico d'acqua potabile che sfruttano le torri del vento. Esistono due tipi di struttura degli ab-

Fig.6 Patio interno, casa tradizionale iraniana. Foto dal sito pinterest.com, consultato il 9/9/17

Fig.7 Ab-anbar, Yazd. Foto dal sito picssr.com, consultato il 2/2/18

anbar: a cisterna cilindrica o rettangolare. Nel primo caso si tratta di cisterne pubbliche con copertura a cupola; nel secondo invece sono prevalentemente ad uso privato con copertura piana sostenuta di pilastri all'interno delle fondazioni delle residenze. I materiali usati sono mattoni speciali di malta impermeabile, che compongono pareti molto spesse. L'acqua proviene dalla rete di qanat oppure dalle sporadiche piogge torrenziali.

Localizzazione
Le prime cisterne risalgono alla prima civilizzazione persiana del secondo millennio avanti Cristo e si possono trovare sia in città che sulle antiche vie commerciali.

Funzionamento
Il complesso è composto da tre elementi: la cisterna, interrata sia per mantenere bassa la temperatura al suo interno, sia resistere meglio alla pressione dell'acqua che per resistere ai frequenti terremoti che affliggono la regione; il corridoio di accesso alla sala per prelevare l'acqua; le torri del vento, necessarie per la ventilazione che aiuta a mantenere l'acqua fresca e a prevenire la nascita di microorganismi. Usualmente si tratta di quattro torri disposte attorno al corpo centrale, in questo modo possono catturare tutti e quattro i venti prevalenti grazie a condotti unidirezionali o bidirezionali.

3.8 Yakhchal

Descrizione
L'yakhchal[9], o casa del ghiaccio, è una struttura pubblica per produrre, contenere e conservare il ghiaccio. Esso viene prodotto nei mesi più freddi e gli abitanti possono usufruirne durante tutto l'anno. Le case del ghiaccio servono per conservare il cibo, preparare bibite fresche e gelati.
Le più antiche yakhchal risalgono alla dinastia safavide (1501-1722) e si compongono da tre elementi: il bacino in cui si produce il ghiaccio, il grande muro ombreggiante, e la stanza in cui lo si conserva. Il bacino per la produzione del ghiaccio ha pianta rettangolare profonda 40-50 cm, realizzata con mattoni cotti impermeabili. A sud del bacino un muro molto spesso ombreggia l'intera struttura durante tutto il giorno e accelera il processo di refrigeramento durante la notte. La neve delle montagne vicine viene occasionalmente conservata in questi edifici, anche se principalmente il ghiaccio viene prodotto con

Fig.8 Case del ghiaccio, Yazd. Foto di Pastaitaken, CC BY-SA 3.0, consultato il 3/12/17

Fig.9 Cupole, Yazd. Foto dal sito theguardian.com, consultato il 14/11/17

l'acqua proveniente dagli qanat.

Localizzazione
Questo tipo di costruzioni si possono trovare all'interno delle mura cittadine ma anche a qualche chilometro di distanza, come nel caso del yakhchal vicino a Kerman, capoluogo della regione omonima nel centro dell'Iran.

Funzionamento
L'acqua si trasforma in ghiaccio durante le fredde notti invernali, e al mattino, prima dell'alba, viene spostato nella stanza di conservazione dove viene coperto dalla paglia, usata come isolante, oppure conservato sotto forma di polvere secca. La stanza di conservazione del ghiaccio ha una copertura cupolata e una larga fossa al centro. Le dimensioni della sala variano molto, uno degli esempi più grandi si trova a Meybod, nella provincia di Yazd. Qui la fossa è profonda 6 metri e la cupola raggiunge i 13 di altezza. La profondità della fossa determina la temperatura perciò l'escursione termica esterna non ha alcuna ripercussione sul ghiaccio. L'altezza della cupola permette all'aria calda di posizionarsi nel livello più alto e più lontano dal ghiaccio.

Oggi queste strutture non sono più utilizzate, sono state quasi del tutto abbandonate e sono vulnerabili alla spietata erosione del deserto. Fortunatamente alcune di queste sono state restaurate e trasformate a nuovi usi, come musei o tea house.

3.9 Qanat

Descrizione
I qanat[9] sono una serie di pozzi connessi canali sotterranei che trasportano l'acqua per migliaia di chilometri, attraversando il deserto. La rete di qanat è stata costruita in tempi antichissimi, circa tremila anni fa, con tecniche molto particolari al fine di combattere la mancanza di acqua della regione. Usualmente i qanat erano usati per l'approvvigionamento di acqua potabile e per l'irrigazione di orti e frutteti, per permettere la vita nel deserto. Senza di essi migliaia di villaggi e città non sarebbero nate; l'esistenza delle oasi si basa esclusivamente sulla presenza di questi canali sotterranei.
Il sistema di qanat è realizzato con materiali locali, sono resistenti ai disastri ambientali e bellici, non sfruttano alcuna forza tranne quella di gravità, tra-

Fig.10 Qanat, Iran. Foto dal sito pinimg.com, consultato il 14/11/17

sportano l'acqua con perdite minime e senza rischiare la contaminazione.

Localizzazione
I qanat nascono in un terreno in pendenza ai piedi di un cono alluvionale, o in un bacino montano o in una valle alluvionale; percorrono migliaia e migliaia di chilometri nel deserto sino ad arrivare nelle oasi o nelle città. Le aree coltivate si trovano sempre in prossimità del mazhar, punto più lontano in cui l'acqua emerge in superficie, che solitamente si trova nella piazza più importante del villaggio. A valle del mazhar l'acqua scorre in superficie in canali aperti o coperti che si ramificano tra i giardini, i campi e in tutto il villaggio. Cisterne, case del ghiaccio, hamman, moschee e mulini sono costruiti lungo questi canali. Alla fine del suo percorso l'acqua confluisce in un bacino per poi essere ridistribuita alle fattorie.

Funzionamento
Il labirinto di canali e pozzi è composto da alcuni elementi essenziali: il pozzo madre, il primo, quello che si trova più vicino alla falda acquifera; la sezione bagnata, cioè il tratto di terreno che assorbe l'acqua e la filtra; la sezione asciutta, i tratto del percorso in cui l'acqua non è più raccolta ma solo trasportata; la galleria, tunnel quasi orizzontale che trasposta l'acqua per migliaia di chilometri; i pozzi, scavati ad intervalli regolari in modo da facilitare l'estrazione dell'acqua e ventilare il canale sotterraneo; infine il mazhar.
In inverno, quando c'è meno bisogno d'acqua, essa è conservata negli ab-anbar per essere usata durante l'estate. L'intera città è dotata di innumerevoli pozzi connessi alla rete di canali sotterranei che a loro volta raggiungono il basamento degli edifici più antichi della città e questo permette di diminuire la temperatura interna di oltre 20°C.
Un aspetto interessante è sicuramente il sistema di organizzazione e divisione dell'acqua, che assicura la massima efficienza e il minimo spreco. Il metodo più comune erano le misurazioni basate sul tempo: un particolare orologio calcolava il tempo massimo per l'irrigazione dei campi per ogni terreno agricolo.

Oggi, sebbene i qanat siano stati sostituiti da cisterne o pozzi moderni, alcune aree agricole e città del centro Iran, tra le quali Yazd, beneficiano ancora di questo antico sistema per uso personale. Tuttavia queste strutture vengono via via dimenticate o danneggiate: anche se nella provincia di Yazd si contano ancora 3300 canali di cui 3000 attivi, si riscontra un aumento dell'inquinamento delle acque a causa degli scarichi industriali. La massiva estrazione

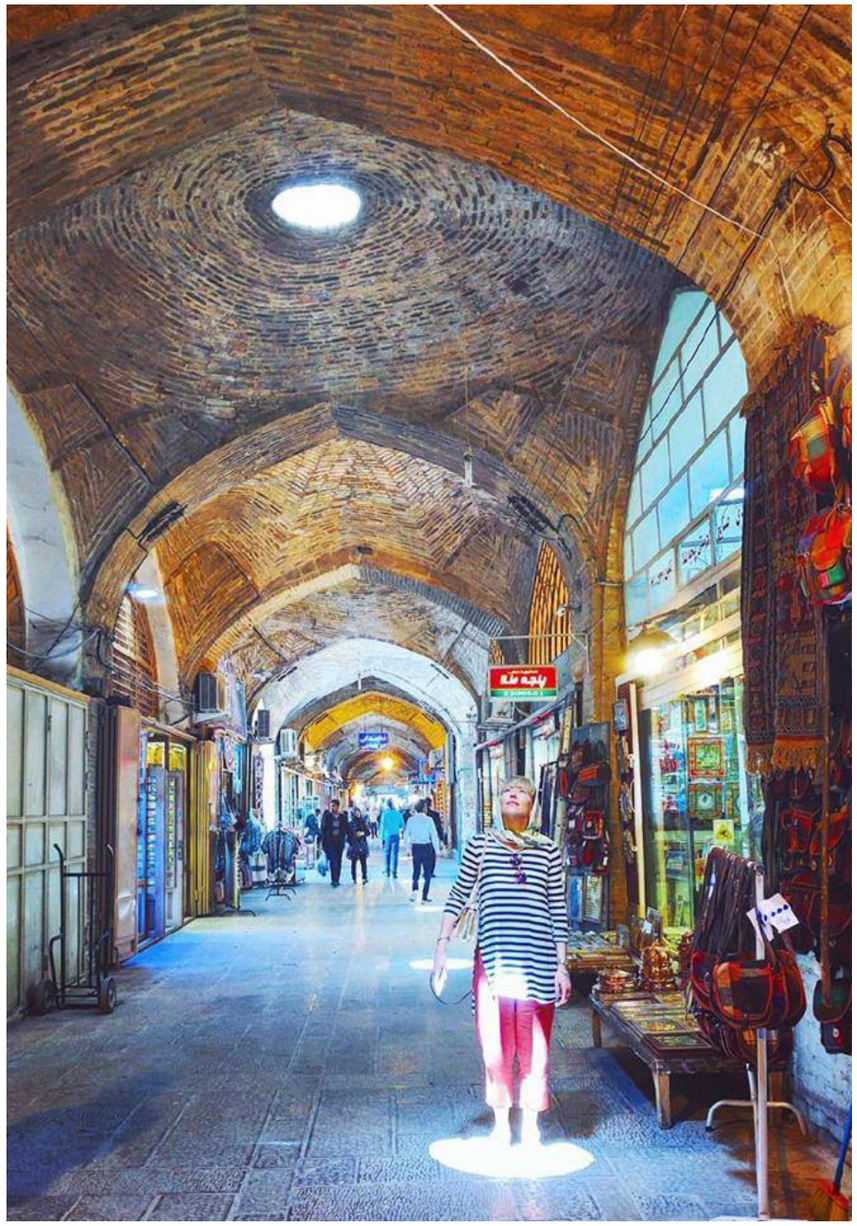


Fig.11 Bazaar. Foto dal sito tumbler.com, visitato il 14/11/17

delle nuove tecniche causa l'esaurimento delle riserve acquifere oltre che a danneggiare il terreno e le fondazioni degli edifici circostanti. I moderni pozzi consumano molte risorse energetiche, hanno vita limitata, e necessitano di costante manutenzione, al contrario dei tradizionali qanat.

3.10 Bazaar

Descrizione

Si tratta di un ambiente pubblico tutto interno che attrae i più attivi centri commerciali e artigianali nel cuore storico della città. Ogni via è identificabile attraverso specifici prodotti commerciali simili o affini: c'è la via delle stoffe e dei sarti, quella dei calzolai, delle carni e delle verdure. I vari segmenti omogenei di suq, il mercato, esaltano ciascuno una qualità o una caratteristica del prodotto che la caratterizza: colori, materiali, luci, suoni e odori impregnano intensamente il tessuto urbano tanto da diventarne elemento imprescindibile dell'architettura pubblica islamica iraniana. Soltanto bar e ristoranti sono distribuiti omogeneamente nell'intricata rete del bazar, al servizio di commercianti e clienti.

Localizzazione

Il mercato tende a collocarsi vicino alla moschea del Venerdì secondo un percorso per nulla casuale: le attività considerate profane o meno pure, dei tessitori, conciatori e barbieri, si trovano solitamente in zone periferiche mentre quelle più nobili e utili sono attigue alla moschea. Questo percorso di distribuzione delle attività crea un senso di ordine e purificazione che conferisce un'aura di "santità" attorno al luogo di culto.

Funzionamento

Un altro schema gerarchico che regola il bazar si basa sulla disposizione degli spazi da generici a specifici e sulla distinzione tra luoghi investiti dal traffico casuale della folla a quelli più appartati e raccolti. Alcuni suq di notte vengono chiusi da pesanti porte per proteggere e isolare la zona che così risulta sempre tranquilla, riservata e piena di colori e odori tipici. Altri funduq, edifici a corte, si sviluppano su più piani e svolgono la funzione di laboratori e magazzini. I qaisariyya sono gli spazi dove si custodiscono le mercanzie più pregiate e preziose.

Il processo di lavorazione artigianale avviene sotto gli occhi dei passanti a

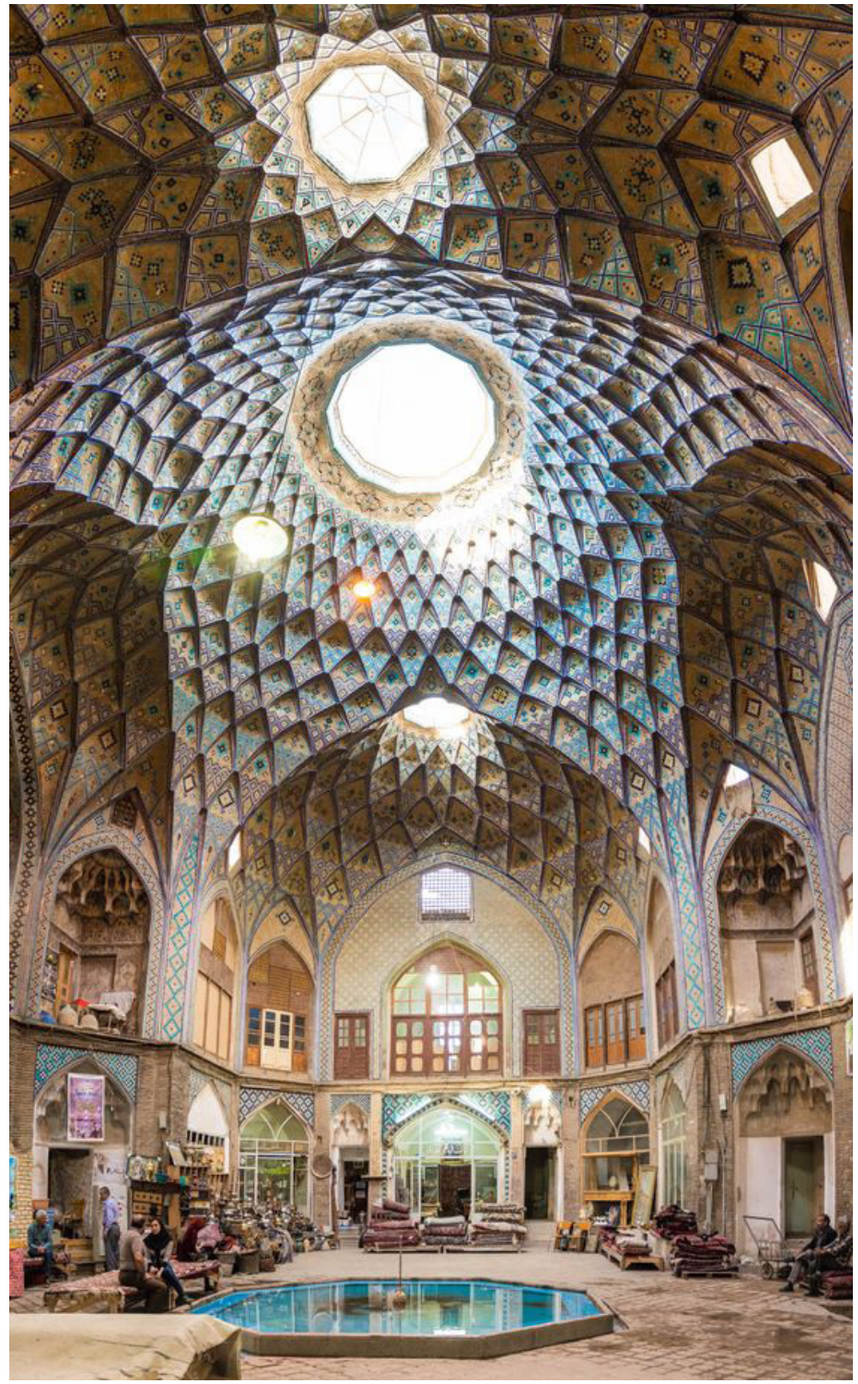


Fig.12 Caravanserraglio, Kashan, Iran. Foto dal sito lostwithpurpose.com, consultato il 14/11/17

prova dell'abilità e dell'onestà dell'artigiano.

3.11 Caravanserraglio

Descrizione
I caravanserragli sono strutture costituite da un ampio cortile porticato e stanze libere per i viandanti e le loro carovane che attraversavano il deserto. Nel complesso erano presenti locande, stanze private, stalle e fontane per l'abbeveraggio di cammelli e cavalli. Sono complessi di origine persiana (epoca achemenide 550-330 a.C.) ma si possono trovare in tutta l'Africa settentrionale e il Medio Oriente; il nome significa "gran confusione" perché erano veri e propri mini bazar. Queste costruzioni erano spesso rinforzate e protette da alte mura contro gli attacchi dei banditi. Oggi molte di queste sono state riconvertite in strutture ricettive, altre sono state distrutte o abbandonate.

Localizzazione
Essi si trovano usualmente nel deserto lungo le vie commerciali poiché erano considerate i punti in cui fare sosta durante un viaggio o lungo gli spostamenti delle carovane per il commercio. I più famosi si trovano ogni 25 chilometri lungo la Via della Seta, che dalla Turchia portava alla Cina. In territorio iraniano si trovano a metà strada tra Isfahan e Natanz.

3.12 Mashrabiyas

Descrizione
È un sistema dell'architettura tradizionale per controllare la ventilazione naturale e la luce. Si tratta di schemi formati da una grata in legno dal pattern geometrico. Questi schermi contribuiscono al controllo della privacy, ventilazione, della luce, dell'umidità e quindi del raffrescamento naturale degli spazi interni.

Localizzazione
Solitamente tali schermi sono posizionali nella parte superiore delle aperture, per catturare le brezze più fresche, ma possono assumere dimensioni diverse, fino a estendersi in un'intera facciata. Gli abitanti possono regolare i flussi d'aria grazie a elementi interni che si posizionano tra le aperture.

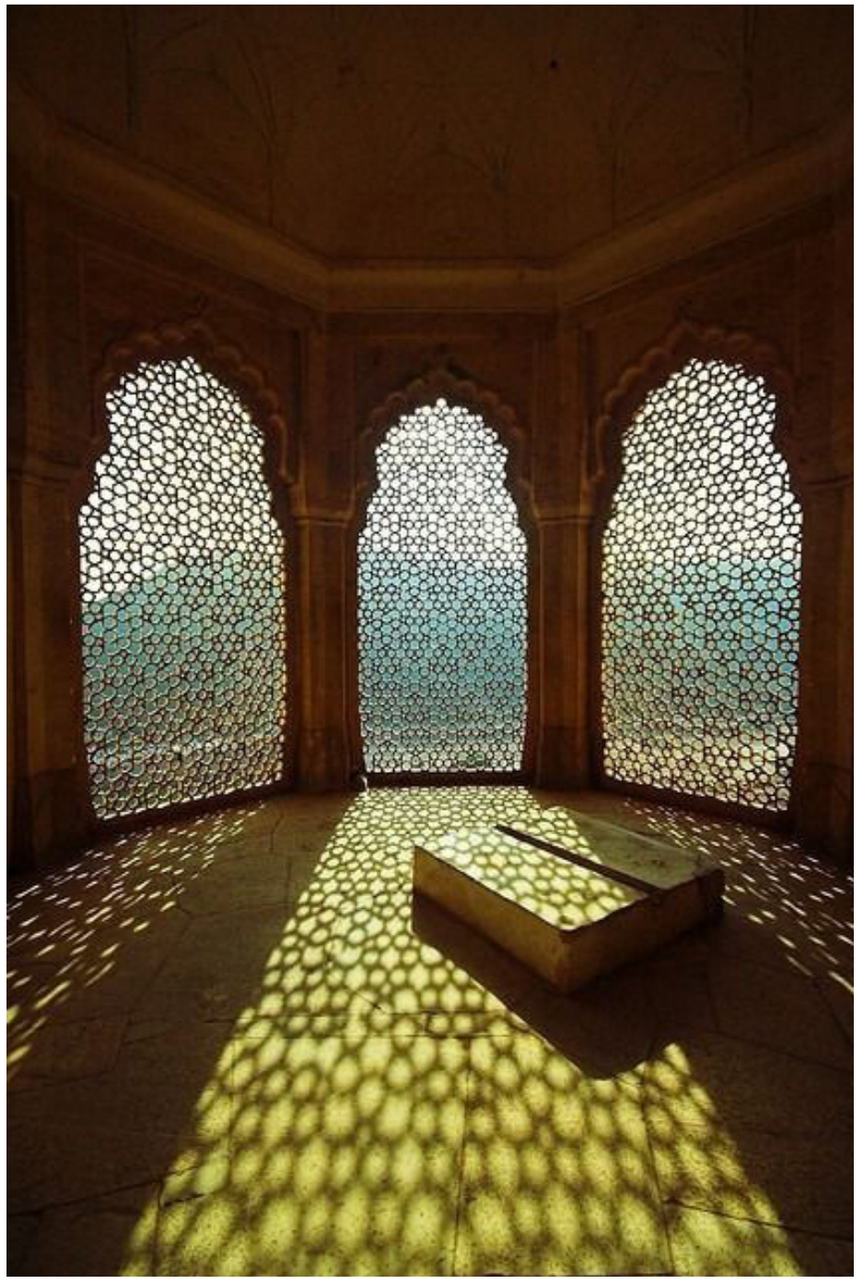


Fig.13 Mashrabiyas, Amber Fort of Rajsthan, India. Foto dal sito lespersiennes.com, consultato il 14/11/17

Funzionamento
La superficie perforata regola la velocità e la quantità dell'aria in entrata; inoltre riduce l'umidità se all'esterno l'umidità è elevata, mentre se all'esterno l'aria è arida il legno rilascia umidità nell'ambiente interno. Negli interni l'aria entra a piccole quantità ma ad alta velocità.

Questo principio è ripreso nell'architettura moderna e contemporanea dalle facciate a doppia pelle: i due strati vetrati aiutano a ridurre gli effetti dell'irraggiamento solare, creano uno spazio cuscinetto che incrementa il senso di confort nelle stanze.

Note:

1 Barbero, 1992
2 Fusaro, 1984
3 confraternite religiose
4 medersa
5 Fusaro, 1984
6 sala di preghiera di quartiere
7 Barbero, 1992
8 Weber, 2014
9 termine usato in Fanood,2014

Bibliografia:

R. Abouei, *Conservation of Badgirs and Qanats in Yazd*, Central Iran, The 23th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, PLEA, 2006

A. A'zami, B*adgir in traditional Iranian architecture*, International Conference "Passive and low energy cooling for the built environment", Santorini, 2005

A. Bandarabad, *Rethinking sustainable street design in hot arid zone cities*, Department of urban planning & design Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, 2009

W. Barbero, *Tipo e forma nelle città arabizzate*, Corso di caratteri tipologici

dell'architettura, Politecnico di Milano, a. a. 1992/1993

M. R. Fanood, *The role of four key structures in the creation and survival of cultural landscapes in the desert environment of Iran*, Journal of Architectural Conservation, Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, France, 2014

F. Fusaro, *La città islamica. La struttura urbana pubblica: il suq, strada e mercato*, Editori Laterza, 1984.

K. Herdeg, *Formal structure in islamic architecture of Iran and Turkistan*, Rizzoli New York, New York, 1990

A. Hutt, L. Harrow, *Iran 1: Islamic architecture*, Scorpion Publications, 1977

A. Hutt, L. Harrow. *Iran 2: Islamic architecture*, Scorpion Publications, 1978

S. M. Moossavi, *Passive Cooling Systems for Hot-Arid Climate in Islamic Iranian Architecture*, International Conference on Islamic Arts and Architecture 5th Edition, New Delhi, 2011

K. Saranti, *Air moving in and through building: historical prototypes and contemporary applications*, International Workshop on Energy Performance and Environmental Quality of Buildings, July 2006, milos island, Greece

F. Soflaee, M. Shokouhian, *Natural cooling systems in sustainable traditional architecture of Iran*, International Conference "Passive and low energy cooling for the built environment", Santorini, 2005

R. A. Staccioli, *Le Terme di Roma antica*, Tascabili economici newton, 1995

W. Weber, S. Yannas, *The historic hammams of Damascus and Fes, in Lessons from vernacular Architecture*, earthscan editore, Abingdon, 2014

W. Weber, S. Yannas, *Climatic design of Islamic bath buildings, in Lessons from vernacular Architecture*, earthscan editore, Abingdon, 2014

F. Yegül, *Baths and bathing in classical antiquity*, Mit press, 1992

Capitolo 4

Torri del vento

"Le torri del vento sono il simbolo dell'architettura iraniana e in particolare della città di Yazd, alla quale conferiscono uno skyline unico nel suo genere. Queste torri, chiamate badgir, catturano le brezze fresche per garantire un sistema di raffrescamento passivo all'interno degli edifici tradizionali. I badgir sono la sintesi perfetta tra tradizione e sostenibilità."

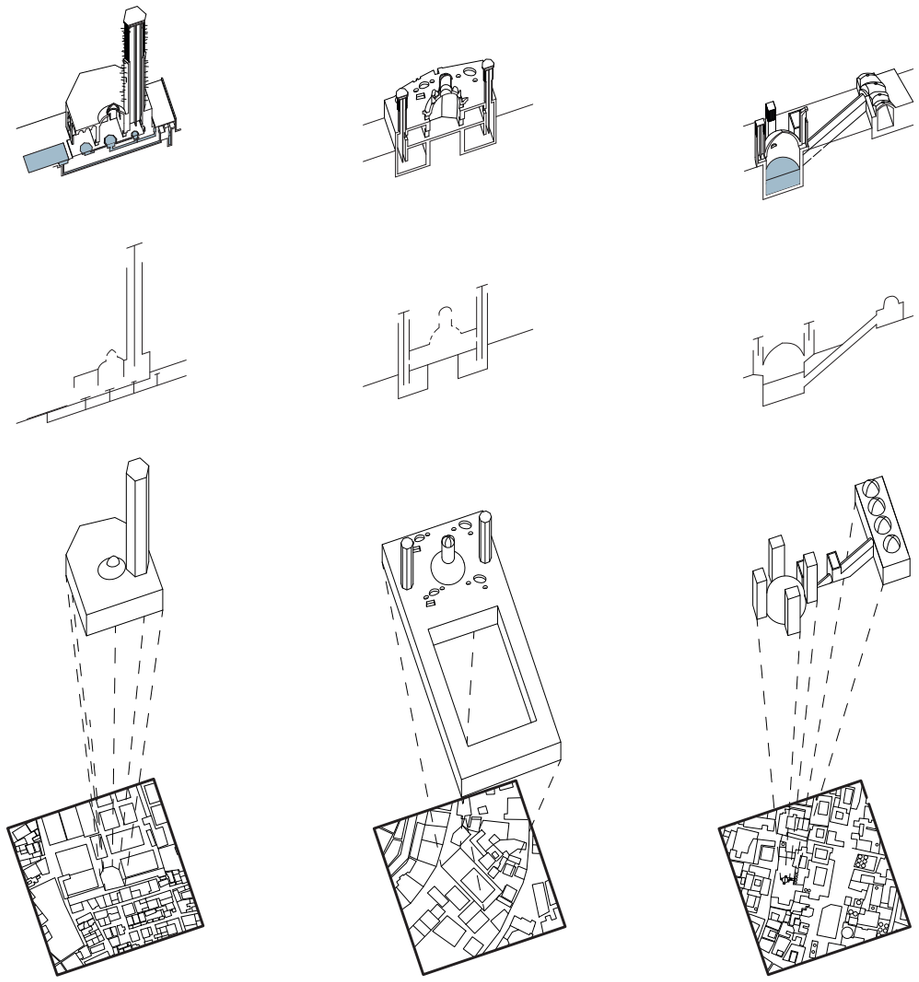
4.1 Definizione

"Le torri del vento sono costruzioni tradizionali usate per provvedere al raffrescamento passivo all'interno degli edifici incanalando i venti e facendo circolare l'aria fresca in tutte le stanze. Tali costruzioni sono in perfetta armonia con la natura."[1]

Le torri del vento sono costruzioni tipiche in Egitto e in Iran e sono nate dalla necessità di inventare un nuovo metodo per agevolare la ventilazione interna agli edifici senza aumentare la dimensione delle aperture che comprometterebbero la protezione ai raggi solari e la privacy. Le torri del vento spingono l'aria fresca all'interno degli edifici e mandano fuori quella calda e viziata; esse funzionano sia quando c'è vento sia quando non c'è grazie alla differenza di temperatura che permette la circolazione dell'aria. Esse hanno la capacità effettiva di modificare la temperatura all'interno dell'edificio. La circolazione dell'aria può essere regolata da vari punti dell'edificio semplicemente aprendo o chiudendo le varie aperture.

4.2 Funzionamento

Le torri del vento lavorano in vari modi in base alla temperatura dell'aria, all'intensità della radiazione solare, alla velocità del vento e al cambiamento climatico.
Durante il giorno il lato sud della torre viene surriscaldato e così anche l'aria all'interno del condotto si riscalda e sale. Questo provoca un vuoto d'aria all'interno dell'edificio che viene subito riempito dall'aria fresca proveniente dalla corte interna mentre l'aria viziata esce dalle aperture a nord dell'edificio.
Di notte la temperatura si abbassa enormemente e l'aria fresca raggiunge i livelli più bassi dell'edificio, a questo punto però a contatto con le superfici dell'edificio, che rilascino il calore immagazzinato durante il giorno, si riscalda e sale. Si forma così un moto convettivo dall'alto verso il basso che continua finché la temperatura delle superfici e quella esterna si equivalgono, a questo punto però la notte cede il passo al mattino.
La temperatura scende considerevolmente soprattutto se la torre del vento è provvista di una vasca d'acqua al di sotto del canale di ventilazione. Fontane o corsi d'acqua possono essere sostituiti anche da speciali filtri che causano lo stesso risultato.



Nome: Brujerdiha House
Luogo: Kashan, Iran
Data di costruzione: 1857
Funzione: residencia de la familia Borujerdi Area: 10'139 mq
Altezza torre: 40 m
Tipologia della torre: torre del vento

Nome: Dowlat Abad Garden
Luogo: Yazd, Iran
Data dicostruzione: 1747
Funzione: jardín histórico de persia
Area: 594 mq
Altezza torre: 33,8 m
Tipologia della torre : torre del vento con sistema de evaporazione e qanat

Nome:Fahaden Water Reservoir
Luogo:Yazd, Iran
Data di costruzione:1737
Funzione:cisterna sotterranea d'acqua
Area:43 mq
Altezza torre:6 m
Tipologia della torre: 2 tipi dei torre diversi, una in mattoni e una in argilla

Fig.1 Schema delle tipologie edilizie con badgir. produzione propria.

4.3 Tipologie

Tra torri del vento Iraniane e quelle Egiziane esistono diverse distinzioni. In Egitto sono chiamate torri *malqaf* e lavorano esclusivamente per assorbimento mentre in Iran i *badgir* funzionano sia per assorbimento che per estrazione. Nei territori dell'antica Persia i *badgir* hanno forme e caratteristiche diverse in base al clima della regione e anche alla funzione dell'edificio, essi infatti venivano realizzati sia per gli edifici civili che per quelli religiosi. I *badgir* delle regioni a sud dell'Iran sono tozzi con un rapporto altezza-sezione di 1 a 1, perché i venti sono deboli, mentre nelle regioni centrali in cui si trova Yazd le torri sono alte e slanciate con un rapporto altezza-sezione di 2 a 1, per catturare le correnti più fresche e meno contaminate dai *black wind*, venti carichi di sabbia dal deserto. Inoltre lo spessore delle pareti e la sezione del condotto è pianificata in base alla quantità d'aria da muovere.
La principale distinzione nelle torri del vento riguardano la sezione del condotto d'aria presente nel fusto:

-condotto singolo
-condotto doppio
-condotto triplo
-condotto multiplo

I *badgir* a condotto singolo, chiamati *Ardakani badgir*, sono orientati verso la direzione prevalente dei venti, l'edificio presenta aperture controvento mentre la torre rivolge la bocca sottovento. Queste sezioni sono tipiche delle zone soggette a black wind come la zona del deserto di Kavir.
Quelli a condotto doppio, *Kermani badgir*, si trovano in luoghi dove la direzione dei venti è molto variabile perciò si hanno due bocche, alternativamente una sottovento e l'altra controvento. Tipiche sono le torri a condotto doppio delle cisterne d'acqua di Yazd.[1]
Gli esempi a condotto triplo non sono molto usuali sebbene ci sia qualche esempio a Tabas.
Le torri del vento a condotto multiplo, gli *Yazdi badgir*, hanno sezione rettangolare o poligonale e si trovano principalmente a Yazd negli edifici religiosi, essi sono più flessibili perché riescono a catturare venti di qualsiasi direzione e sono molto alti per catturare quelli più freschi. Il badgir più alto si trova a Yazd al Dowlat-Abad Garden ed è alto 33 m.

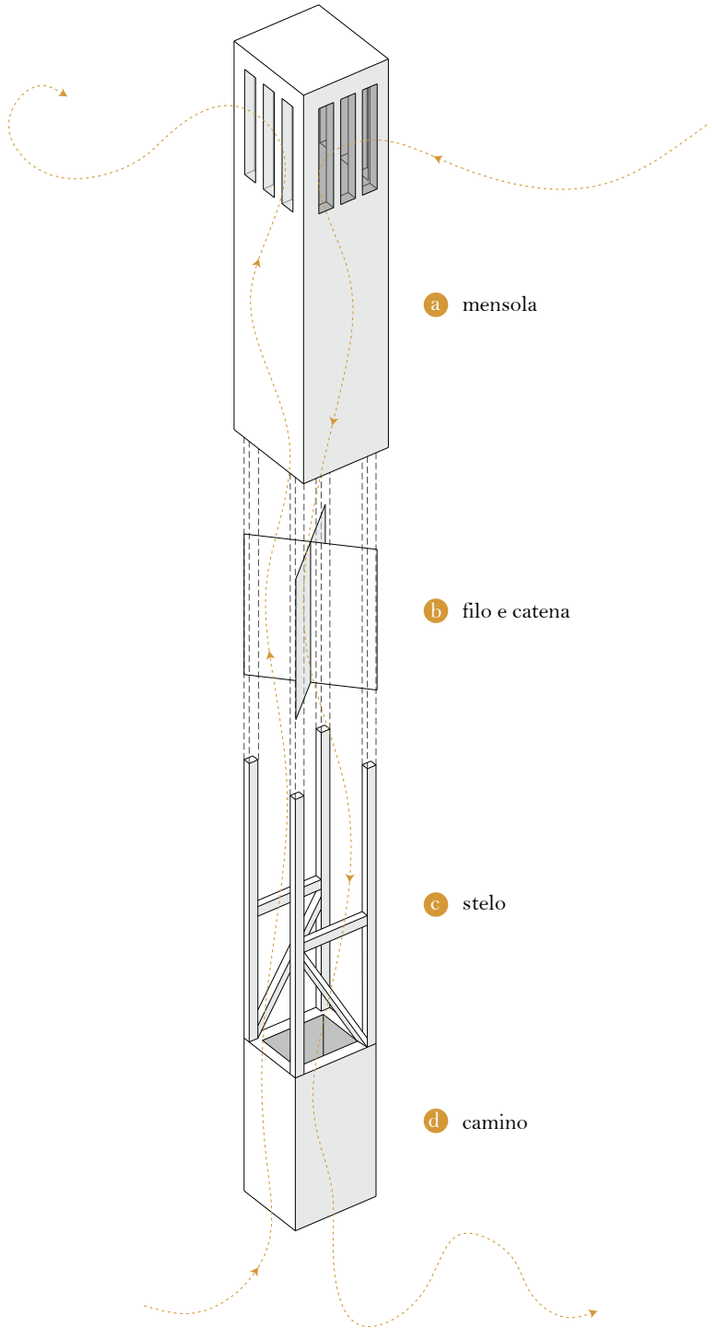


Fig. 2 Schema elementi che compongono un badgir, da A. A'zami, 2005. Rielaborazione propria.

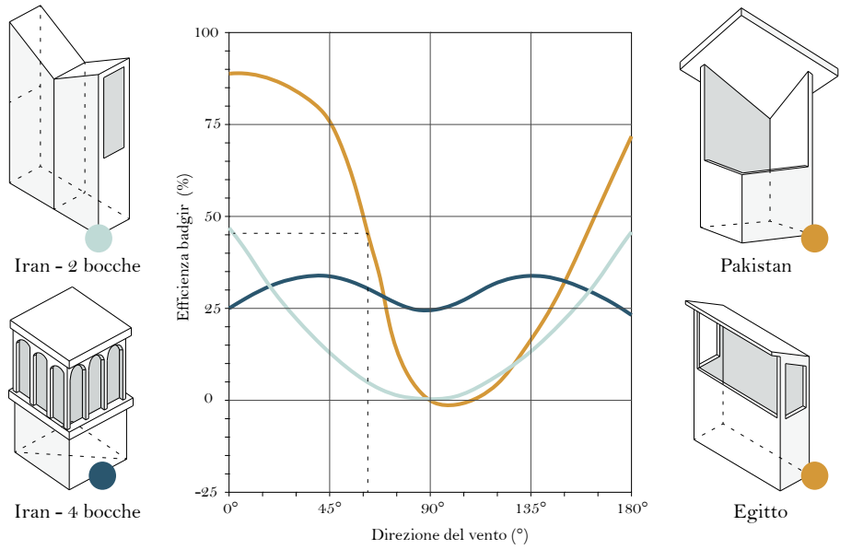
Un'altra caratteristica importante riguarda aspetti sociali ed economici infatti esistono torri che hanno solo scopo funzionale ed altre che possiedono significato simbolico: le torri più alte indicano gli edifici di potere.
A volte si possono vedere torri del vento isolate, apparentemente non connesse agli edifici circostanti, in realtà tunnel sotterranei le connettono a uno o più edifici nelle vicinanze.

4.4 Elementi

Le torri del vento sono formate da diverse parti che adempiono a funzioni differenti:

-camino
-stelo
-filo e catena
-mensola

Il **camino** è la parte più bassa della torre, ha la forma di una piramide tronca, è alto circa 1,80 m e collega direttamente la torre con gli ambienti interni. Nei climi caldi e secchi il basamento è provvisto di Hozkhaneh, una vasca d'acqua usata per il raffrescamento evaporativo; questa sala si chiama anche Tabestanneshin, che significa "luogo fresco in cui stare d'estate".
Lo **stelo** è il corpo più sviluppato, collocato tra il camino e la mensola. Più lo stelo è lungo e più la torre sarà alta. Solitamente è realizzato con mattoni che creano decorazioni particolari sulla facciata esterna. Lo stelo è suddiviso in due o più canali verticali che aiutano a separare i moti ascensionali da quelli discensionali.[2]
Il **filo** e le **catene** si trovano tra lo stelo e la mensola e possono avere forme diverse.
La **mensola** infine è il capo della torre del vento e solitamente ha forma allungata e presenta un fronte aperto e uno chiuso in relazione alla direzione dei venti.



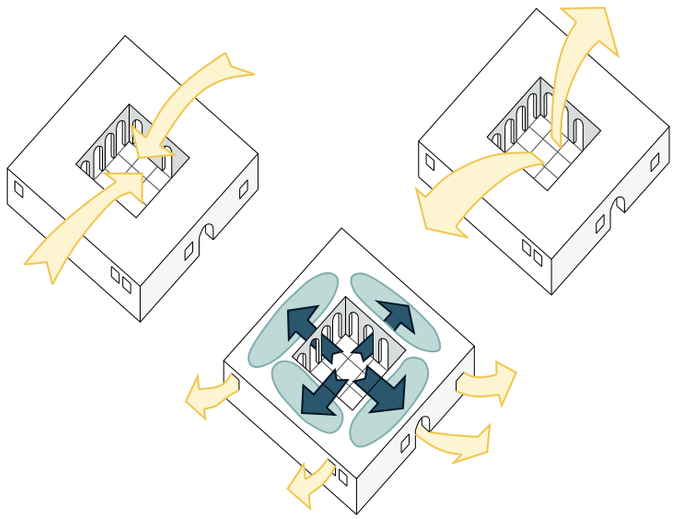


Fig.3 Grafico delle efficienze alle diverse direzioni del vento per i 4 tipi di torri del vento. Dati da K. Saranti, 2006. Rielaborazione propria.
Fig.4 Schema del raffescamento con il patio verde, da K. Saranti, 2006. Rielaborazione propria

4.5 Materiali e struttura

I materiali costruttivi usati sono in armonia con il clima e per questo hanno un'elevata inerzia termica e sono mattoni, mattoni di fango (kheshts), legno shoruneh, che resiste alle termiti e agli agenti naturali, intonaco di malta d'argilla e paglia a Yazd, mentre intonaco di malta e limo a Bandar Lenghe, sulla costa del Golfo Persico, per prevenire la penetrazione d'umidità all'interno delle pareti.[3] La mixtura fangosa solitamente contiene terra, materiale vegetale essiccato e pietrisco. A Yazd le facciate sono intonacate di color pannocchia per agevolare la riflessione dei raggi solari, inoltre la presenza di paglia all'interno della malta aumenta la ruvidità delle superfici per ostacolare maggiormente la radiazione. A Bandar Lenghe invece le facciate sono prevalentemente intonacate di malta bianca. A volte le facciate sono decorate con piastrelle smaltate fissate da stucco o malta.
A Yazd la struttura delle torri è composta da matasse di legno che fungono da pilastri e controventi all'interno dello strato di mattoni di fango per aumentare la resistenza alle spinte laterali.
Queste matasse tengono insieme l'intera struttura della torre mentre alcuni pezzi di legno sporgono all'esterno per formare una scala a pioli che consenta di costruire la bocca della torre del vento (mensola). In climi caldi umidi come a Bandar Lenghe la struttura è realizzata con legno Chandal, resistente all'umidità, alla decomposizione e alle termiti.

4.6 Il patio verde

Il patio, presente soprattutto nella casa tradizionale, è parte integrante del sistema per il raffrescamento degli ambienti interni; esso è soggetto a tre fasi differenti durante la giornata.
Nella prima caso, quando la presenza del vento è richiesta, il patio deve rimanere aperto il più possibile, per permettere la circolazione delle brezze fresche.
Nel secondo caso, quando l'edificio deve essere protetto dall'azione del vento, è bene che le pareti che delimitano il patio siano alte e le sue aperture serrate.
In generale quanto più grande è il rapporto tra altezza e distanza tra le pareti del patio e più la ventilazione è accentuata.

4.7 I badgir contro l'emergenza ambientale

"Cultural landscapes represent the combined works of nature and of man. They are illustrative of the evolution of human society and settlement over time, under the influence of the physical constraints and opportunities presented by their natural environment and of successive social, economic and cultural forces, bot external and internal." [4]

Con questa definizione l'UNESCO sostiene che il territorio dell'altopiano iraniano possieda un paesaggio e una cultura ricchissima che deve essere preservata dai pericoli e dalla deteriorazione irreversibile del tempo.
Le informazioni sul cambiamento climatico globale dimostrano che le temperature stanno aumentando anno dopo anno in tutto il pianeta, ciò significa che la domanda di sistemi di raffrescamento sarà sempre più grande. L'International Energy Agency nel suo rapporto del 2015 sostiene che la domanda energetica degli edifici sia aumentata del 3,6% dal 2002 al 2012, e che questi dati non si fermeranno se non si attua un cambiamento della politica energetica nazionale.
Un sistema di raffrescamento evaporativo elettrico raffresca l'aria calda esterna che, tramite un ventilatore, viene direzionata verso un cuscinetto di paglia inumidito. Qui l'aria si raffresca e viene immessa nell'ambiente interno. Questi sistemi però consumano dal 15 ai 60 litri d'acqua al giorno in base alla dimensione dell'impianto che a sua volta dipende dal flusso d'aria al m2 e dalle caratteristiche dell'ambiente da raffrescare.
In Iran si contano dai 7 agli 8 milioni di sistemi di raffrescamento evaporativo elettrici oggi e questo numero è destinato ad aumentare. Ognuno di questi impianti consuma circa 550 Wh, considerando che rimangano accesi 18 ore al giorno nella stagione estiva, significa 1000 kWh all'anno per 25 giorni al mese e 4 mesi all'anno. Le statistiche provano che nel 2008 il consumo di energia elettrica in Iran raggiungeva i 215 milioni di kWh, di cui il 2% derivano dall'utilizzo di impianti di raffrescamento.
Oggi a Yazd si contano meno di 500 torri del vento sui tetti degli edifici storici, e ciò testimonia l'utilizzo di sistemi elettrici alternativi. Se solo l'1% di questi venisse sostituito con badgir, torri del vento, il consumo di elettricità diminuirebbe considerevolmente, alleggerendo così il paese intero da spese gravose per la società e per il pianeta.[5]
L'utilizzo di energia rinnovabile e la riscoperta dei metodi tradizionali sono

quindi un imperativo che non si può più ignorare, soprattutto perché le torri del vento sono più efficienti che gli altri impianti elettrici. Una politica concentrata sull'energia pulita non porterebbe benefici solo nella riduzione di emissioni nocive, ma anche a un migliore qualità dell'aria all'interno degli edifici.
Sfruttare il sole e il vento per produrre energia non è solo un modo per ottenere energia pulita ma è anche un atto finanziariamente sensato.
I badgir potrebbero integrarsi perfettamente con le nuove tecnologie grazie alla semplicità della loro realizzazione ed efficienza.
Lo studio pubblicato nel 2016 alla quarta Conferenza Internazionale sulla Smart Energy Grid Engineering (IEEE) compara le temperature e l'umidità relativa dell'aria all'interno di un edificio raffrescato con badgir e con un sistema di raffrescamento evaporativo elettrico.

4.8 Nuove soluzioni

Una nuova proposta vuole unire il fascino delle torri del vento tradizionali con le nuove tecnologie che permettono di ottenere risultati ottimali, sfruttando lo stesso principio delle torri del vento tradizionali. Il prototipo proposto nel 2007 durante il 24° Simposio Internazionale di Automazione e Robotica nelle Costruzioni (ISARC 2007) avvenuto a Madras, si compone di un sistema intelligente alimentato elettricamente da pannelli fotovoltaici. Questa torre del vento intelligente è capace di ruotare liberamente a 360° quindi assumere l'angolazione ottimale per il comfort interno. Il sistema è dotato di un motore DC alimentato da un circuito driver PWM che assicura un alto livello di efficienza con il minimo surriscaldamento. Il Fuzzy supervisory controller è in grado di stabilire in che direzione la torre deve ruotare per essere nella posizione ottimale. Il Fuzzy supervisory controller analizza le informazioni sensibili di direzione del vento, velocità del vento, temperatura esterna e voltaggio della batteria. Il tutto viene monitorato da un software, PROMETEUS.
È previsto anche un sistema di umidificazione dell'aria che può essere un canale d'acqua al basamento della torre oppure un umidificatore artificiale.
Per verificare l'efficacia del prototipo si è proceduto con un test in 12 differenti condizioni climatiche (tre diverse temperature e a quattro velocità del vento) usando il simulatore MATLAB. I risultati dimostrano che il prototipo è in grado di controllare perfettamente l'intero sistema e di ottenere così performance ottimali nella maggior parte delle condizioni climatiche studiate.

I punti di forza del prototipo sta nella semplicità del design, nel basso consumo di risorse energetiche e dal minimo costo globale dell'impianto. Tutto ciò permette l'istallazione in qualsiasi area, che sia cittadina o remota.
Altri prototipi che coniugano la strategia delle torri del vento e le nuove tecnologie sono stati studiati e realizzati in occidente, come nel caso del Visitor Center, Zion National Park, USA.
In questo caso il condotto d'areazione è di alluminio e può ruotare su se stesso per catturare le brezze fresche da qualsiasi direzione. Il sistema è anche dotato di chiusure, per i momenti in cui il flusso d'aria non è desiderato.

Note:

1 K. Movahed, 2016
2 F. Soflaee, 2005
3 A. A'zami, 2005
4 M. R. Fanood, 2014
5 dati da K. Movahed, 2016

Bibliografia:

A. A'zami, *Badgir in traditional Iranian architecture*, International Conference "Passive and low energy cooling for the built environment", Santorini, 2005

C.Benedetti, G. Leone, M. Baratieri, I. M. Brauer, *Natural ventilation and traditional architectonical devise: physical analysis of badgir structure*

A. El-Shorbagy, *Design with Nature: Windcatcher as a Paradigm of Natural Ventilation Device in Buildings*, International Journal of Civil & Environment Engineering

M. R. Fanood, *The role of four key structures in the creation and survival of cultural landscapes in the desert environment of Iran, Journal of Architectural Conservation*, Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, France, 2014

Z. Hedayat, B. Belmans, M. H. Ayatollahi, I. Wouters, F. Descamps, *Performance assessment of ancient wind catchers- an experimental and analytical study*, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015

K. Movahed, *Badgir (Wind Catcher) an Example of Traditional Sustainable Architecture for Clean Energy*, The 4th IEEE International Conference of Smart Energy Grid Engineering, Shiraz, 2016

M. Poshtiban, R. B. Khosroushahi, S. Poshtiban, *Intelligent windcatcher- a combination of modern and traditional technology*, 24th International Symposium an Automation & Robottic in Construction (ISARC 2007) Construction Automation Group, I.T. Madras, India, 2007

K. Saranti, *Air moving in and through building: historical prototypes and contemporary applications*, International Workshop on Energy Performance and Environmental Quality of Buildings, July 2006, milos island, Greece

Capitolo 5

Yazd

"Yazd, la sposa del deserto, possiede una tra le più antiche architetture del mondo. Situata in mezzo a due deserti, è sopravvissuta nei secoli senza mai essere conquistata né distrutta. Qui la cultura islamica si fonde con quella più antica zoroastriana, creando una città unica in storia, architettura e paesaggio. Yazd, la città delle torri del vento, come viene chiamata sulle guide turistiche, oggi potrebbe diventare "città del vento" beneficiando del suo genius loci, per migliorare l'ambiente urbano."

5.1 Introduzione geografica

Si trova a 670 km da Tehran ed è la capitale della provincia di Yazd che comprende i territori tra i due deserti dell'altopiano iraniano: il *Kavir-e-Loot* e il *Kavir-e-Namak*. Il clima è molto secco, può non piovere per più di sei mesi all'anno e c'è una forte escursione termica stagionale e giornaliera.
La città possiede un'enorme patrimonio culturale e storico delle civiltà in qualsiasi epoca. Fortunatamente, grazie alla sua posizione geografica lontana dalla capitale e nel mezzo del deserto, Yazd è rimasta immune dalle più grandi conquiste e distruzioni delle guerre, mantenendo intatta così la struttura urbana e lo stile architettonico per secoli.
La regione è soggetta a terremoti che purtroppo danneggiano gli edifici storici presenti.
L'economia di Yazd si basa sull'artigianato, sull'industria tessile, il commercio e in parte sull'agricoltura. Il commercio più famoso di Yazd è quello dei tappeti fatti a mano in casa dalle donne.
Dal 1977 la città è capitale dell'omonima regione che conta circa 1.486.152 abitanti[1], con una crescita annua del 3,1%.

Il processo di decadenza a cui Yazd è soggetta dipende dal fatto che la maggior parte della classe media ha abbandonato la città antica, preferendo i nuovi edifici dei quartieri moderni; il potenziamento delle infrastrutture ha riguardato solo le aree più sviluppate e gli edifici antichi subiscono la decadenza dell'inesorabile passare del tempo.

5.2 Storia e architettura della città

L'architettura e la trama urbana è stata fortemente influenzata dal clima. Le origini della città risalgono al tempo di Alessandro Magno, che costruì una fortezza per lasciarvi i prigionieri. Solo più tardi nacque e si sviluppò la vera e propria città. Esistono ritrovamenti che indicano che la città esisteva in epoca sassanide (226-640). L'età più fiorente della città si ebbe con l'espansione Islamica del XIV secolo quando venne eretta la Moschea del Venerdì.
L'industrializzazione ha avuto enormi effetti sul sistema dei trasporti, sul modo di abitare e le abitudini socio-urbane; per queste ragioni il tessuto urbano cominciò a cambiare negli anni '60. Dal momento in cui apparvero le prime

Fig.1 Carta di Yazd. Foto dal sito Yazd.com, consultato il 2/2/18

automobili le stradine, da sempre in sabbia e sassi, si convertirono rapidamente in strade asfaltate. Fortunatamente questi cambiamenti non stravolsero del tutto la citta, ricca di un patrimonio architettonico unico. Il primo Masterplan, preparato negli anni '60 dall'Ufficio della Facoltà delle Arti dell'Università di Teheran, fu rivisto un decennio più tardi, anche se le devastanti conseguenze della rivoluzione islamica del '79 e la successiva guerra con l'Iraq durante gli anni '80 hanno impedito la messa in opera dei cambiamenti previsti.
Negli anni '80 il Ministero delle Abitazioni e dello Sviluppo dell'Iran creò il settore architettonico del *Tessuto Urbano Antico*, per tutelare le molte città storiche dell'Iran, tra le quali c'era ovviamente Yazd.
Durante gli anni '90 Yazd fu scelta come la città più bella per struttura urbana, funzioni e rete viaria del tessuto antico.

5.3 Il masterplan del '78

Ne 1978 la municipalità di Yazd approvò un nuovo masterplan che doveva risollevare la città dalla decadenza nella quale era caduta durante gli ultimi decenni. Sotto l'attenzione dei progettisti vi era in primo luogo il quartiere antico della città, ma anche le aree agricole a sud e l'incessante avanzare del deserto a nord.
La città vecchia è il cuore geometrico e simbolico; esso è circondato da un anello viario appena superate le mura, mentre all'interno un intricato sistema di vie pedonali permette l'accesso solo a piccoli autobus pubblici. Di particolare importanza è l'identificazione e la classificazione degli edifici che compongono la città vecchia: dalle aree degradate, agli edifici da demolire, quelli da restaurare, da mantenere, quelli in buone condizioni e quelli in totale contrasto con l'atmosfera tradizionale.
La necessità più grande è un nuovo sistema di spazi pubblici e servizi all'interno della città vecchia, ridonando vita alle molte aree degradate. È indispensabile inoltre definire quali degli edifici meritano di essere conservati e protetti, e quelli che possono essere trasformati per assumere funzioni pubbliche. Un buon intervento di riqualificazione focalizza l'attenzione nelle aree di connessione tra tessuto antico e nuovo al fine di ricucire armoniosamente il tessuto della città.
Il masterplan prevede la progettazione di un percorso pedonale attorno alle antiche mura cittadine, dotato di servizi e spazi pubblici per godere del luogo. Quattro distretti collocati agli angoli del quartiere tradizionali sono stati scel-

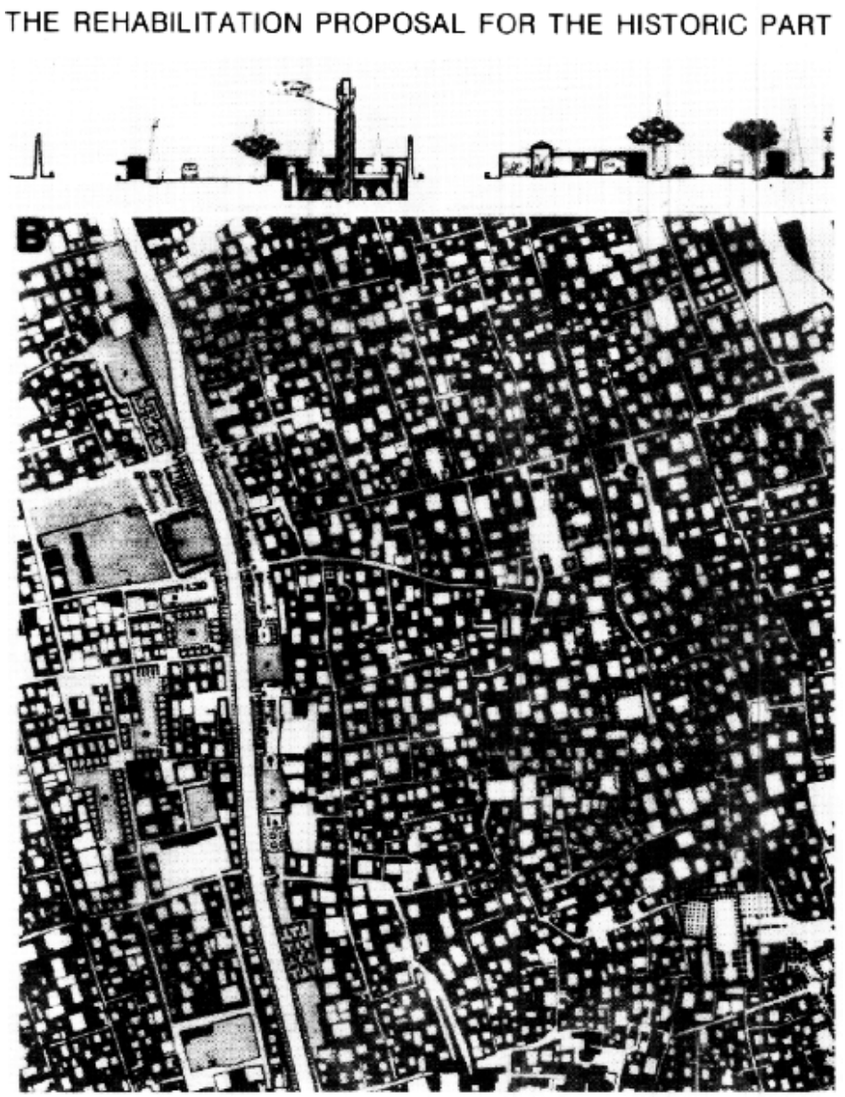


Fig.2 Proposta di riabilitazione del centro storico, 1978. Foto dal sito Yazd.com, consultato il 2/2/18
Fig. 3 (pagine successive) Mappa di Yazd con analisi del verde. Produzione propria.
Fig. 4 (pagine successive) Mappa di Yazd con analisi del tessuto urbano. Produzione propria.

ti per fare da legante tra la città vecchia e i nuovi quartieri.
Per riparare alle disastrose conseguenze dello sventramento, l'arteria Seid Golesorh è stata scelta per ospitare un centro lineare con spazi pubblici e servizi.
Un altro punto cruciale è la salvaguardia delle aree agricole attorno alla città, ora fortemente minacciate dalla speculazione. La sopravvivenza di queste aree è di fondamentale importanza per l'equilibrio climatico della città.
I confini nord-est della città sono minacciati dall'avanzamento del deserto e per questo il masterplan prevede la realizzazione di una cintura verde che impedisca alla sabbia di entrare nelle aree urbane.
Il nuovo centro governativo doveva essere spostato a sud, lontano ma ben collegato con il cuore della città.
Una buona parte del masterplan del 1978 prevedeva lo sviluppo delle aree residenziali secondo il piano tout court che rigettava qualsiasi standard occidentale, troppo lontano per tradizioni, clima e società. Il piano prevedeva la realizzazione di unità abitative singole con patio interno a due piani fuori terra. I volumi, i colori e i materiali dovevano rifarsi alla tradizione.
Per concludere il masterplan del 1978 riconosceva due città distinte: la città vecchia e quella nuova. Gli interventi proposti miravano a connetterle per creare un'unione compatta e armoniosa.

5.4 La città vecchia

Secondo quanto affermato nello studio di Ghezelbash e Abooziea nel 1985, la maggior parte delle case e gli edifici pubblici nella città vecchia di Yazd risalgono alla fine del XIX secolo o agli inizi del XX, durante la dinastia Ghagar.
Nel bazaar ci sono tunnel con scale che portano in locali sotterranei collegati ai qanat.
L'edificio storico più importante a Yazd è la *Moschea Gamie*. Si tratta di un'architettura magica, con un'armonia perfetta tra forma e funzione. L'entrata è caratterizzata dai due alti minareti, la corte con i ricchi giardini con mosaici dorati. La sala più grande della moschea, chiamata Shabestan, è coperta da un cupola meravigliosamente decorata.

Yazd

N

E

S

Intensità vegetativa

min

max

acqua

0 1000 2000 4000 m

Yazd

N
O
E
S

Tessuto urbano

organico

bidirezionale

unidirezionale

0 1000 2000 4000 m

5.5 Analisi urbana

Il tessuto urbano è denso, compatto e uniforme; il centro cittadino è segnato dalla presenza della Moschea del Venerdì che aveva uno stretto legame con il bazaar più importante della città; oggi però questa relazione è stata spezzata perché durante il XIX secolo il bazaar si è spostato più a sud.
Le strade del centro hanno uno schema irregolare e presentano un grande numero di vie senza uscita.
La città vecchia è circondata da mura con quattro entrate, tuttavia oggi solo una piccola parte del muro è sopravvissuta, anche se la sua traccia è visibile. L'architettura di Yazd può essere considerata come la libera e armoniosa estensione della natura.
Il cuore della città antica si trova a nord della attuale Yazd. I nuovi quartieri si svilupparono più a sud, beneficiando del terreno più favorevole per l'agricoltura, senza un impianto urbanistico preciso.
Negli anni '70 la città vecchia venne tagliata e divisa da grandi arterie stradali, che distrussero moltissime fabbriche antiche.

L'aeroporto di Yazd è collocato fuori città, lontano dalle aree residenziali; la stazione ferroviaria è di buon accesso per qualsiasi punto della città. La rete ferroviaria nazionale collega Yazd con le altre città. La zona industriale si trova in una posizione ottimale secondo la direzione dei venti tale da non contaminare la città con l'inquinamento prodotto.

5.6 Le problematiche

Le problematiche della Yazd attuale derivano dal fatto che la città storica non incontra più le aspettative degli abitanti; ciò è dovuto in parte all'innalzamento degli standard di confort, in parte all'instabilità strutturale degli edifici storici che quindi risultano essere inagibili. Il centro storico, con le grandi e bellissime case tradizionali, ha subito uno spopolamento a favore delle periferie.
In epoca pre-moderna e moderna si adottò una strategia urbana non compatibile al tessuto urbano presente e questo ha creato una grande mancanza di affinità tra l'architettura storica e quella contemporanea. Ciò ha causato uno scompenso tra architettura e concetto di privacy: se prima le famiglie abitavano in piccoli complessi residenziali nei quali disponevano di molte stanze e

un elevatissimo livello di privacy, ora con i piccoli appartamenti di derivazione occidentale si trovano costretti a sacrificare i principi basilari dell'abitare.
Il restauro degli edifici storici richiede moltissimo tempo, sforzi e denaro. Gradualmente però si sta arrivando a soluzioni economiche e culturali che consistono nel riadattamento dei monumenti storici a nuovi usi.
Le aree parcheggio del entro cittadino risultano non adeguate e non di facile e rapida accessibilità; l'illuminazione notturna è insufficiente e l'inquinamento atmosferico è percepibile ad occhio nudo.
Tutto ciò porta alla necessità di dare nuova vita alla città con infrastrutture attrattive e luoghi per il divertimento e il ritrovo.
Dalla fine degli anni'80 a oggi la maggior parte dei cittadini di Yazd manifestano forte insoddisfazione del sistema viario; i cambiamenti necessari sono: la costruzione di nuove vie più spaziose che però non compromettano il patrimonio storico e architettonico del centro città; una gerarchizzazione delle strade; la realizzazione di nuovi accessi alle residenze e parcheggi; ripensare alla rete di distribuzione locale solo per il traffico locale perchè il traffico transitorio non deve entrare nel centro città. Le strade non devono disturbare o compromettere la sicurezza e la tranquillità dei quartieri; il centro città deve essere considerato come unico: nessun'arteria stradale può dividerlo in due.

5.7 Analisi climatica

La città di Yazd si trova in clima desertico. Le temperature medie mensili si aggirano attorno ai 30°C in estate e, durante i mesi più freddi, Dicembre, Gennaio e Febbraio, non si abbassano mai oltre i 5 °C. Il livello delle precipitazioni è scarsissimo: annualmente si parla di 40 mm di pioggia, concentrati nei mesi invernali e primaverili. Durante le secche estati l'umidità relativa scende fino al 12%. Annualmente invece sfiora il 30%[2].La zona dell'altopiano di Yazd è caratterizzata dalla costante presenza di venti a una velocità media di 16 km/h, mentre la direzione prevalente, al 41% delle statistiche annue, è Nord/Ovest[3].

5.7.1 Diagramma di Olgyay

Secondo il diagramma di Olgyay l'area di benestare è "*la situazione in cui non viene provata alcuna sensazione di disagio*"[4] , essa varia al cambiare delle condizioni ambientali come temperatura dell'aria, umidità, vento, calore radiante ma anche a parametri soggettivi come l'attività svolta, l'abbigliamento o l'ac-

climatazione. L'area di benestare si calcola a partire dalla massima temperatura media del luogo (33° C a Yazd) per poi identificare la zona a +2,78°C e a -2,78°C compresa tra il 20% e l'80% di umidità. Dal momento che l'area si trova al di sopra della soglia stabilita (29,45°C) la si abbassa fino a raggiungere tale soglia. In ultimo si disegnano sul grafico le linee corrispondenti ai mesi, identificate dai punti di massima temperatura/minima umidità e minima temperatura/massima umidità.
Per un'analisi più precisa si devono considerare però gli indici di abbigliamento clo. L'indice clo 0.9 indica un abbigliamento invernale, 0.4 quello estivo mentre 0.75 autunnale o primaverile a Yazd. Per ogni 0.5 clo si alza l'intera area di benestare di 3°C.

5.7.2 Diagramma di Givoni

In questo diagramma psicometrico-bioclimatico sono evidenziate diverse aree alle quali sono abbinate diverse strategie per ottenere il livello di comfort desiderato. Una volta posizionati correttamente i punti di ogni mese con massima temperatura/minima umidità e minima temperatura/massima umidità viene identificata immediatamente la strategia da utilizzare per estendere l'area di benestare[5].

1.Zona di confort
2.Zona di confort esteso
3.Massa termica
4.Raffrescamento evaporativo
5.Ventilazione naturale permanente
6.Ventilazione naturale notturna
7.Guadagni interni
8.Sistemi solari passivi
9.Sistemi solari attivi
10.Umidificazione

Da qui si capisce che le migliori strategie bioclimatiche da mettere in atto a Yazd sono:

Dicembre/Gennaio/Febbraio: fornire energia attraverso un sistema solare ibrido attivo-passivo attraverso un sistema di scorta

	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tmed [°C]	HR med [%]
Gennaio	8	1	5	60,5
Febbraio	13	4	8	48
Marzo	18	9	14	40,5
Aprile	25	15	20	32,5
Maggio	30	21	25	26,5
Giugno	36	26	31	17,5
Luglio	37	28	33	16,5
Augosto	36	25	30	17
Settembre	32	20	26	18
Ottobre	26	14	20	25
Novembre	18	7	12	36
Dicembre	12	3	8	50,5

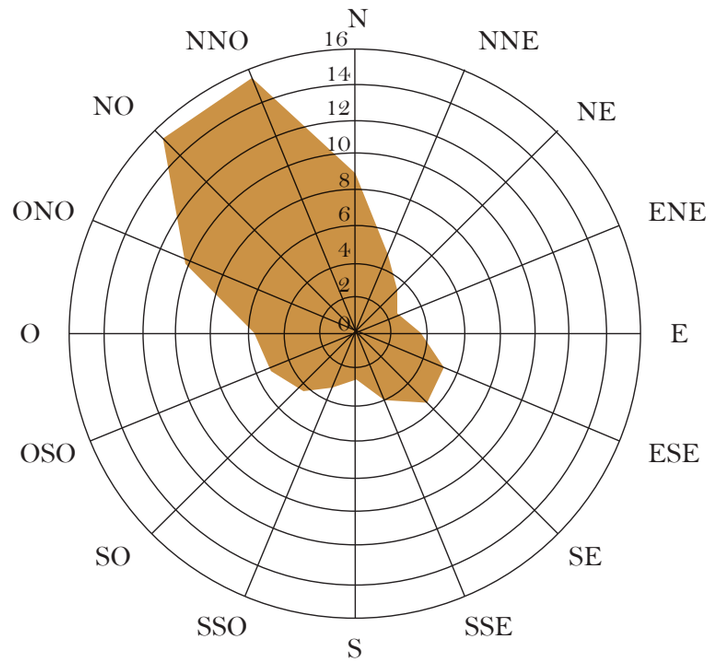


Fig.5 Dati climatici della città di Yazd. Dati dal sito weatherbase.com, consultato il 7/12/17.
Fig.6 Distribuzione delle direzioni dei venti all'anno. Dati dal sito windfinder.com, consultto il 7/12/17

Marzo/Novembre: fornire energia attraverso un sistema solare passivo attraverso un sistema di scorta ma in alcuni casi è sufficiente il calore prodotto dagli apparecchi elettronici all'interno della casa.

Aprile/Ottobre: è sufficiente il calore prodotto dagli apparecchi elettronici all'interno della casa, in alcuni momenti è necessaria solo la protezione dal sole diretto in estate e l'isolamento in inverno.

Maggio: è necessaria solo la protezione dal sole diretto in estate e l'isolamento in inverno, con temperature e umidità elevate il confort può essere ottenuto per evaporazione diretta della traspirazione solo se il movimento dell'aria è sufficiente.

Giugno/Luglio/Agosto/Settembre: situazione tipica dei climi caldi e secchi con notti fredde e secche in cui rinfrescando l'ambiente di notte (è necessaria grande inerzia della struttura muraria) si accumula il fresco necessario alla giornata seguente.

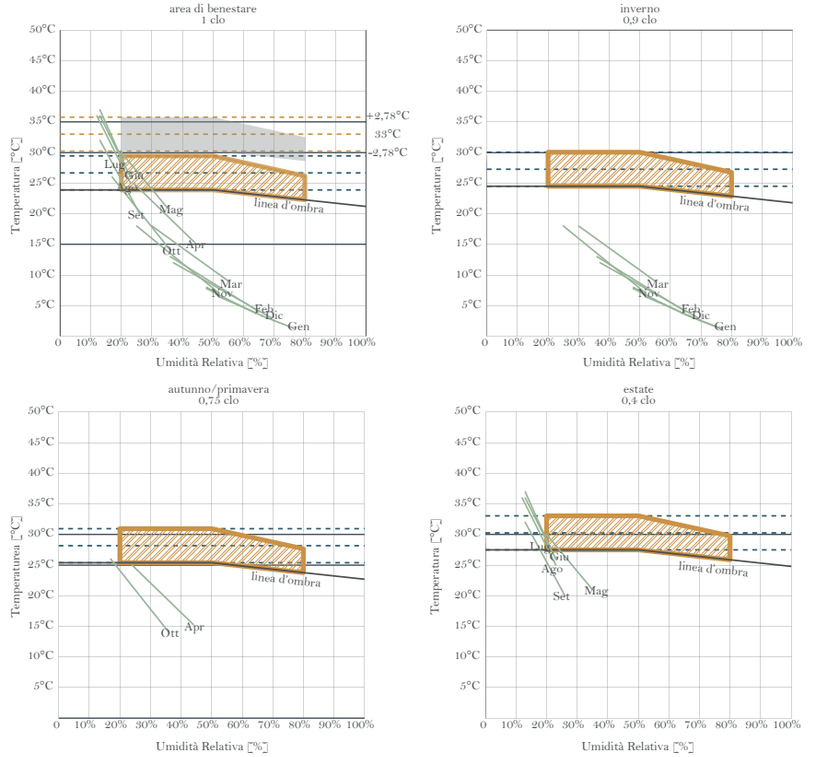
5.7.3 Diagramma delle Isopletas

Questo diagramma è il risultato di un calcolo che prende in considerazione la temperatura e il livello di umidità per ogni ora del 15 di ogni mese. Esso indica l'orario in cui si deve avere ombreggiamento sulle facciate dell'edificio per ottenere rispettivamente il 10% o il 20% di benestare.
Dal calcolo risulta che per il 10% di comfort l'ombreggiamento sulle superfici deve essere:

Gennaio/Febbraio/Marzo: -
Aprile: 14.00 - 16.00
Maggio: 10.30 - 22.00
Giugno/Luglio/Agosto: 00.00 - 24.00
Settembre: 10.30- 24.00
Ottobre: 13.00 - 18.00
Novembre/Dicebre: -

Per il 20% di comfort:

Gennaio/Febbraio/Marzo: -



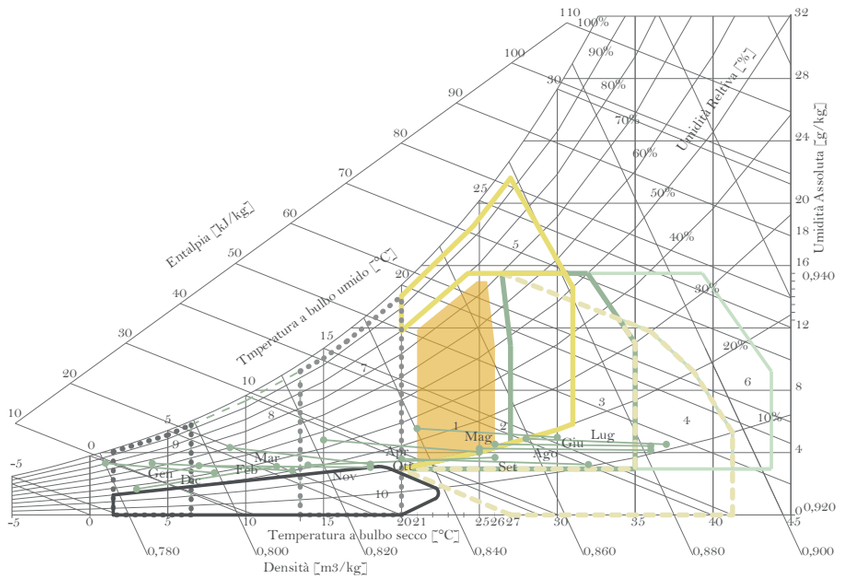


Fig.7 Diagrammi di Olgyay alle diverse stagioni. Produzione propria.
Fig.8 Diagramma di Givoni. Produzione propria.

Aprile: 13.00 - 19.00
Maggio: 10.00 - 23.00
Giugno/Luglio/Agosto: 00.00 - 24.00
Settembre: 10.00- 24.00
Ottobre: 12.00 - 20.00
Novembre/Dicembre: -

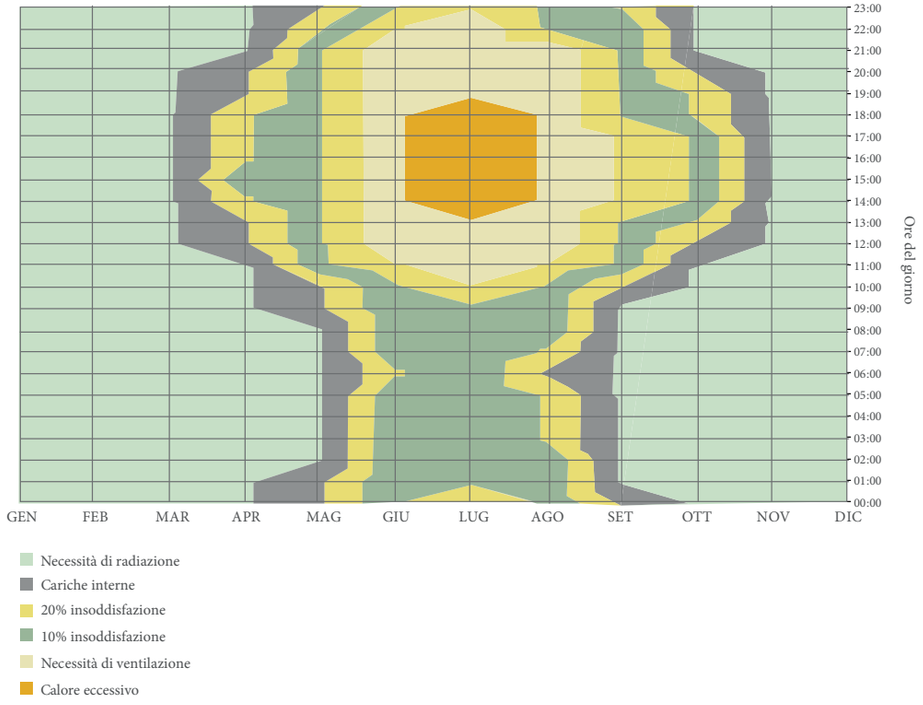
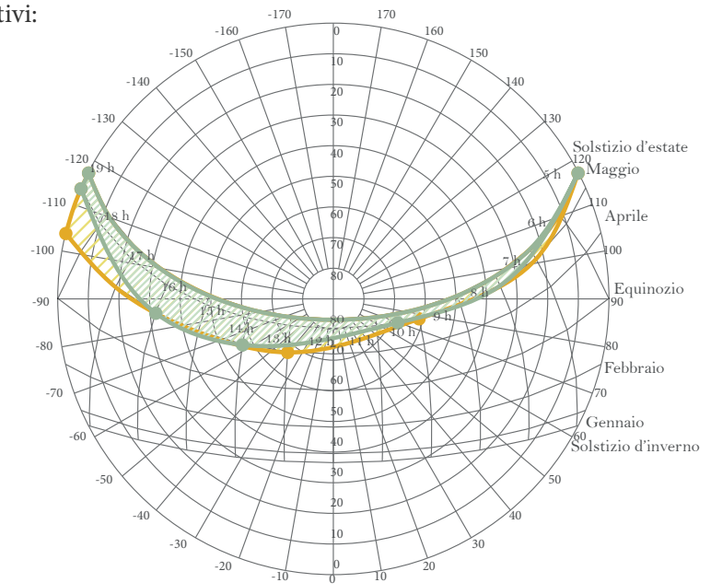


Fig.9 Diagramma delle isopletas. Produzione propria.

5.7.4 Maschere d'ombra

Le maschere d'ombra sono in grado di identificare non solo quando e per quanto tempo della giornata la superficie esterna deve essere in ombra, ma anche il tipo di ombreggianti adatti al raggiungimento di tale scopo.
Nel caso di Yazd si prende in considerazione la maschera solare delle latitudini 30°N. Da subito si nota una grande differenza della necessità di ombreggiamento nei mesi invernali (dicembre, gennaio, febbraio, marzo, aprile, maggio) rispetto a quelli estivi (giugno luglio, agosto, settembre, ottobre, novembre).

Mesi estivi:



Mesi invernali:

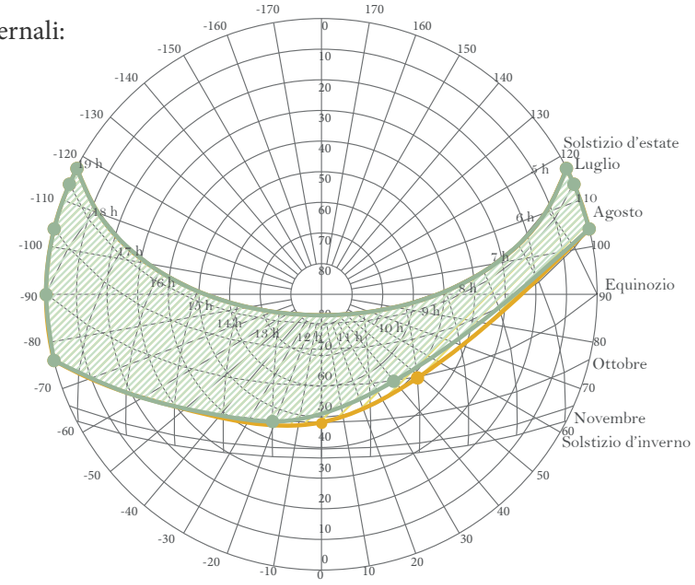


Fig.10 Maschere d'ombra. Produzione propria.

Note

1 dato del 2011
2 dati dal sito www.weatherbase.com
3 dati raccolti da windfinder.com, consultato il 7/12/17
4 Olgyay,1954
5 dal sito www.ilmioconfort.wordpress.com

Sitografia:

www.ilmioconfort.wordpress.com, consultato il 7/12/17

www.weatherbase.com, consultato il 7/12/17

www.windfinder.com, consultato il 7/12/17

Bibliografia:

R. Abouei, *Conservation of Badgirs and Qanats in Yazd, Central Iran*, The 23th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, PLEA, 2006 J.

S. Eiraji, A. Namdar, *Sustainable System in Iranian Traditional Architecture*, International Conference on green Buildings and Sustainable Cities, Iran, 2011

M. R. Fanood, *The role of four key structures in the creation and survival of cultural landscapes in the desert environment of Iran*, Journal of Architectural Conservation, Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, France, 2014

M. Foroozani, *Yazd Old Fort*, Faculty of Architecture Technicl University of Budapest H-1521 Budapest, Hungary, Periodica Polytechnica ser. Architecture vol. 37, NOS 1-4, 1993, pp. 59-72

M. Kowsar, *A Master Plan for Yazd*, in Environmental Design: Journal of the Islamic Environmental Design Research Centre 1-2, edited by Attilo Petrucioli, 80-85. Rome: Carucci Editore, 1989

M. Mahdavinejad, M. Ansari, S. Samadzadeh, S. Rafiei, K. Mousavi, F. Estakhr, C*ontemporizing Valuable Urban Dstricts Regarding to Educating Environment Paradigms, case: Yazd, Iran*, 5th World Confeence on Educational Sciences – WCES, 2013

S. M. Moossavi, *Passive Cooling Systems for Hot-Arid Climate in Islamic Iranian Architecture*, International Conference on Islamic Arts and Architecture 5th Edition, New Delhi, 2011

K. Movahed, *Badgir (Wind Catcher) an Example of Traditional Sstainable Architecture for Clean Energy*, The 4th IEEE International Conference of Smart Energy Grid Engineering, Shiraz, 2016

F. Soflaee, M. Shokouhian, *Natural cooling systems in sustainable traditional architecture of Iran*, International Conference "Passive and low energy cooling for the built environment", Santorini, 2005

Capitolo 6

Il comfort e i sistemi di raffrescamento passivo

"Uno degli obbiettivi primari di una progettazione bioclimatica è quello di raggiungere alti livelli di comfort. Per raggiungere tale obiettivo è necessario approfondire cosa si intende per microclima urbano e quali siano gli strumenti che possono migliorare le condizioni nell'ambiente cittadino. Il vento, l'acqua e la vegetazione sono tra questi. I modelli di comfort stazionari e adattativi permettono di capire quali sono i parametri sensibili per il progetto del comfort. In condizioni climatiche estreme, come a Yazd, il tema del raffrescamento passivo apre le porte a una serie di strategie semplici ma efficaci per raggiungere gli obiettivi prefissati."

6.1 Il microclima urbano

Confrontandosi con la realtà urbana di Yazd ci si trova a contatto con una realtà microclimatica particolare e fragile, che deve essere protetta e salvaguardata.
Si dice microclima il clima a una scala più piccola, l'unico che può essere influenzato dall'intervento umano.[1]
Le variabili principali che caratterizzano il microclima sono la radiazione solare, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa e la velocità del vento. Questi elementi dipendono dalla topografia e dalla latitudine del sito, dalle caratteristiche del suolo e soprattutto dalla forma urbana. La forma urbana crea il cosiddetto clima urbano, molto diverso da quello presente nelle aree rurali circostanti. Questo fenomeno è chiaramente identificato dalle isole di calore, cioè aree in cui la temperatura dell'aria è molto più elevata rispetto alle aree rurali circostanti.
Il fenomeno delle isole di calore dipende da fattori indipendenti tra loro, come la differenza dello scambio radiativo globale netto tra città e campagna aperta, l'accumulo dell'energia solare durante il giorno nella massa edilizia, la concentrazione delle sorgenti di calore e la minore capacità di evaporazione dal suolo. Tutto ciò determina un assorbimento dell'energia solare del 10% in più, rispetto a un'aria corrispondente coperta da vegetazione. Il fenomeno delle isole di calore produce inoltre una brezza esterno-interno che concentra l'inquinamento. L'effetto negativo dell'isola di calore urbana è decisamente più accentuato nei paesi sottosviluppati delle zone calde del pianeta.

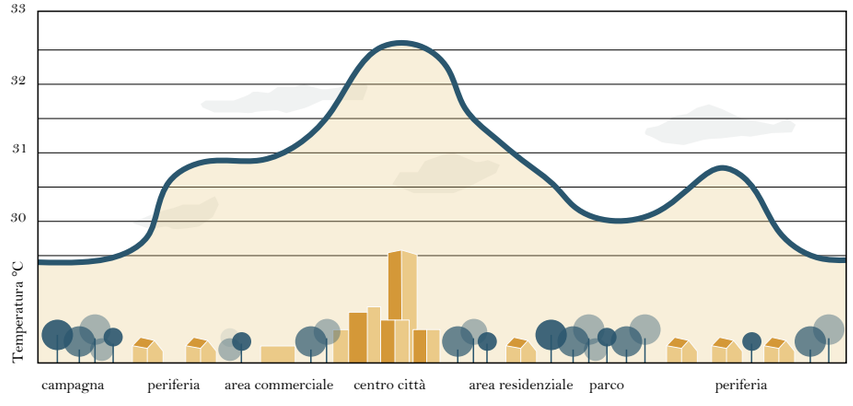


Fig. 1 Profilo urbano dell'isola di calore, da meteolive.it. Rielaborazione propria.

Il surriscaldamento dell'aria è legato alla conformazione del tessuto cittadino infatti la grande concentrazione di aree edificate e le pavimentazioni stradali, dall'alta conducibilità termica, determinano
Si parla di microclima ideale quando si evitano situazioni di stress termico, seppur in condizioni climatiche disomogenee. Nel 1986 Paulo Freire e nel 1998 Mateus Dantas definirono il microclima urbano ideale come:

"una situazione atmosferica all'interno della chioma urbana con un'ampia variazione nel tempo e nello spazio tale da sviluppare condizioni disomogenee per una persona a istanza di 150 m. Dovrebbe essere senza inquinamento dell'aria e senza stress termico, attraverso più ombra e ventilazione (nelle aree tropicali e nei climi temperati in estate), o protezione dal vento (nei climi freddi e in inverno nei climi temperati)"

La variabilità microclimatica influenza il comportamento delle persone e l'uso degli spazi esterni, perciò è molto importante da tenere in considerazione durante la progettazione.
Tuttavia le analisi di comfort non possono essere valutate in maniera oggettiva poiché gli utenti percepiscono le sensazioni termiche dello spazio secondo ragioni fisiologiche soggettive.
Per studiare il comfort quindi si deve tenere conto sia dei parametri ambientali microclimatici, oggettivi e fisicamente quantificabili, che dei fattori di comfort dell'utente, soggettivi e misurabili qualitativamente mediante questionari e interviste.
La vegetazione, l'acqua e il vento migliorano il microclima urbano perché sono in grado di mitigare il clima, diminuire l'effetto delle isole di calore, abbassare la temperatura dell'aria durante l'estate e rinfrescare le aree circostanti.

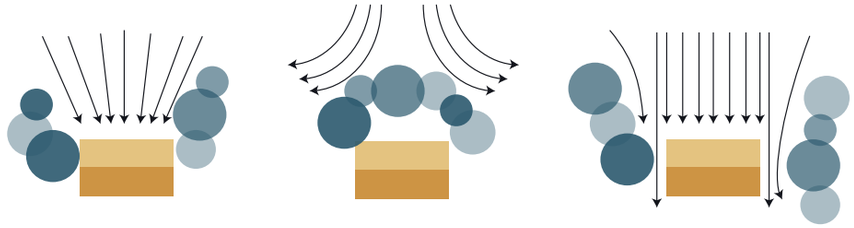
6.2 Il vento

Il vento è uno dei fattori che più influiscono nelle condizioni di comfort pedonale negli spazi aperti. Il vento ha origine dal movimento dell'aria che va da un'area ad alta a una a bassa pressione; direzione e velocità dipendono da caratteri geografici locali; tale fenomeno non è costante, ma subisce variazioni stagionali, annuali repentini. Il controllo dei flussi di vento è un'azione complicata ma essenziale per la modifica del microclima degli ambienti esterni.
In un clima urbano i venti forti penetrano più profondamente di quelli deboli, al di sotto del livello delle coperture.

La velocità del vento attorno e tra gli edifici di una città varia considerevolmente, in funzione del rapporto tra direzione del vento e allineamento delle vie. Quando la direzione del vento è parallela a uno degli assi delle vie si stabiliscono due diversi modelli di comportamento. Nelle vie parallele alla direzione del vento, la riduzione della velocità dovuta all'attrito è minima; mentre in quelle perpendicolari la riduzione della velocità è massima poiché gli edifici fanno da barriera. Se la direzione è diagonale e gli edifici sono di media altezza, sul marciapiede sottovento si avvertirà una brezza molto maggiore rispetto a quello sopravento, a causa dell'incanalamento del flusso.
In generale la vegetazione aumenta la rugosità aerodinamica, dunque diminuisce la velocità del vento in funzione della densità e della dimensione della chioma.
La vegetazione è efficace anche nell'assorbire l'energia del vento e nel deviarne il flusso. Le siepi e i cespugli attuano un'alterazione del profilo della velocità del vento in atmosfera libera.

Per valutare l'effetto della vegetazione sul vento bisogna distinguere due tipi fondamentali di ostruzione: un insieme non strutturato di alberi ad alto, medio e basso fusto (come un bosco o una foresta), e la barriera vegetale (piantumata). In una foresta la riduzione della velocità del vento è massima nel centro della massa del fogliame. In una barriera vegetale piantumata, la riduzione della velocità dipende dalla forma, dall'altezza e dalla porosità della barriera stessa.

L'estensione della zona di calma sul lato sottovento dipende dall'estensione del filare. Oltre un certo limite però, la profondità della zona di calma non varia al variare della lunghezza del filare, mentre si mantiene la proporzione all'altezza. La vegetazione modifica il microclima in relazione alla dinamica dei venti con due effetti opposti: aumenta la temperatura quando agisce da protezione ai venti freddi e la diminuisce quando ostacola i venti caldi oppure devia i venti freddi verso le aree più calde. Ogni cambio del livello del suolo è considerato un'ostruzione al flusso d'aria e ne modifica il percorso. Quando il flusso d'aria incontra un oggetto il suo percorso si modifica. Prendendo in considerazione un oggetto bidimensionale si formano tre zone con movimenti d'aria distinti. Queste tre zone sono collocate nella zona d'impatto tra il flusso e l'edificio, sopra la copertura e a una certa distanza sottovento, chiamata scia.



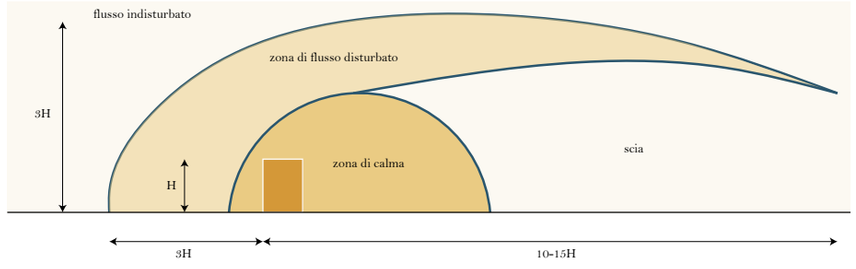


Fig. 2 La vegetazione come dispositivo di guida o deviazione del vento intorno agli edifici, da Sapei, 2015. Rielaborazione propria.
Fig. 3 Sezione schematica del flusso d'aria attorno a un edificio isolato, da Cook, 2000. Rielaborazione propria.

6.3 Il comfort termico

Il *comfort termico* è una condizione di benessere psicofisico che sorge in una persona ed è legata alle caratteristiche del luogo in cui si trova.
L'evoluzione tecnologica attuale permette facilmente il raggiungimento del livello di comfort stabilito ma a scapito di un largo consumo energetico. Dal punto di vista ambientale, l'impronta ecologica e le risorse associate per il mantenimento del livello di comfort termico sono causati dai sistemi di climatizzazione artificiali. Di conseguenza è necessario domandarsi fino a che punto sia sostenibile il conseguimento del benessere termico. Nella migliore delle ipotesi si dovrebbe ottenere il comfort massimizzando l capacità del sistema edificio-impianto di mantenere il benessere con la minor quantità d'energia possibile. In quest'ottica le scelte tecnologiche e impiantistiche devono necessariamente essere accompagnate da un progetto architettonico consapevole e ben integrato al luogo di progetto.
La sensazione di comfort dipende dalla capacità del corpo di mantenere l'equilibri termico. La temperatura del corpo è stabile intorno ai 37°C ma, come afferma Mario Grosso, raggiungere la situazione di neutralità termica, in cui non si necessita né di apporto né di dispersione del calore, non basta per ottenere il benessere termoigrometrico. Esso infatti dipende anche dalle condizioni soggettive di percezione e dalle relazioni con il contesto.
Le caratteristiche dell'ambiente fisico e quelle soggettive individuali si fondono, provocando un effetto sinergico sulla percezione sensoriale complessiva dell'utente[2].
Si nota facilmente, spostandosi in località geografiche differenti, che la risposta al benessere legata alle condizioni climatiche sia molto variabile. È stato dimostrato che, sebbene non esistano particolari differenze fisiologiche tra gli abitanti delle diverse zone climatiche, ciò che cambia è l'aspettativa connessa al microclima locale. Non si può parlare di benessere termoigrometrico senza considerare le sfera individuale. L'abbigliamento, l'attività, il sesso e l'età influenzano considerevolmente il soddisfacimento delle condizioni ambientali.

Tutti gli indicatori di comfort formano una gamma di parametri ambientali in cui ci si trova in condizioni di benessere.
I parametri principali per valutare il comfort sono:

-Temperatura dell'aria [°C]

-Temperatura media radiante [°C][3]
-Velocità dell'aria [m/s][4]
-Umidità relativa
-Pressione atmosferica [Pa]
-Abbigliamento [clo]
-Attività [met]

Il controllo delle condizioni ambientali può essere attivo o passivo: si dice attivo se si agisce sull'attività o sull'abbigliamento, mentre è passivo quando si modificano l'ambiente o l'edificio.
La ventilazione è un fattore indispensabile perché agisce direttamente sulla sensazione di comfort degli individui e, se non controllato correttamente, può facilmente portare a situazioni di discomfort.
La ventilazione naturale può spostare la zona dicomfort verso valore di temperatura più alti.
Si possono distinguere tre tipi di indici: diretti, empirici e razionali.
Gli indici diretti derivano dalla misurazione delle variabili climatiche ambientali: quelli empirici sia da dati climatici oggettivi che dalle sensazioni termiche degli individui; infine gli indici razionali si basano sulle equazioni di bilancio termico del corpo umano.
I principali indici sono l'ASV (Actual Sensation Vote), il CET (Corrective Effect Temperature) e il DISC (thermal discomfort).
Gli indici termici si possono suddividere inoltre in modelli stazionari e modelli adattativi.

6.4 I modelli stazionari

Il corpo funziona come un sistema termodinamico aperto poiché scambia energia e massa con l'ambiente esterno. L'organismo possiede la capacità di autoregolarsi misurando i flussi in entrata e in uscita, per mantenere costante la temperatura corporea (37°C). Quando questo processo non è più sufficiente per raggiungere la neutralità termica si percepirà una sensazione di disturbo.

I *modelli di comfort stazionari* come il PMV (Predicted Mean Vote, Voto Medio Previsto), SET* (Standard Effective Temperature, Standard di Temperatura Effettiva), ET (Effective Temperature, Temperatura Effettiva), PT (Perceived temperature, Temperatura percepita), PET (Physiological Equivalent Temperature, Temperatura psicologica equivalente), UTCI (Universal Thermal Climate Index, Indice universale della temperatura climatica), ecc. sono basati sulle equazioni di bilancio termico.

$$M+W+R+C+Esk+Ere+ESW+S=0 \quad [W/m^2]$$

Dove:
M= tasso metabolico [W/m^2]
W= lavoro fisico in uscita [W/m^2]
R= radiazione netta del corpo umano [W/m^2]
C= flusso di calore sensibile per convezione [W/m^2]
Esk= flusso di calore latente diffuso attraverso la pelle [W/m^2]
Ere= flusso di calore dovuto alla respirazione [W/m^2]
ESW= flusso di calore dovuto all'evaporazione del sudore [W/m^2]
S= flusso di calore immagazzinato per raffreddamento o riscaldamento della massa corporea [W/m^2]

Per convenzione i termini che rappresentano un guadagno di energia al corpo hanno segno positivo (M), quelli che invece rappresentano le perdite di energia hanno segno negativo (W, ESW). Tutti i termini sono condizionati da parametri meteorologici, come la temperatura dell'aria, l'umidità e velocità del vento.
Dal 1984 il metodo PMV è alla base della Norma Internazionale Standard ISO-7730 per la valutazione del comfort termico. Noto l'PMV si può ricavare il PPD (Percentuale Prevista di Insoddisfatti) che indica il numero di individui che non si troveranno d'accordo con le condizioni di comfort stabilite.

$$PPD=100-95 \exp\left[-(0{,}03353\ PMV^4+0{,}2179\ PMV^2)\right]$$

I valori di PPD si aggirano solitamente attorno al 10% (Norma ISO 7730) e non scendono mai più del 5%.
Nel 1970, lo scienziato danese P. O. Fanger ha sperimentato il modello PMV/PPD con l'obiettivo di generalizzare le basi fisiologiche del benessere termico, in modo che, associata ogni attività a un tipo di abbigliamento, si potesse prevedere le condizioni di benessere[5].
Tuttavia i modelli stazionari hanno dei limiti poiché non tengono in considerazione gli aspetti dinamici dell'adattamento termico del corpo.

6.5 I modelli adattativi

La metodologia specifica da utilizzare in ambienti a ventilazione naturale sono i modelli adattativi, che considerano le aspettative termiche in modo flessibile. Nei modelli adattativi si considera che un individuo svolga un ruolo attivo nel creare le condizioni termiche preferite, e non solo un ruolo passivo come nel modello PMV/PPD.
Con il termine adattamento si intendono tutti i meccanismi fisiologici di acclimatazione e i processi comportamentali e psicologici che ogni individuo mette in atto per ottenere la sensazione di benessere. Questi cambiamenti coinvolgono ambiti fisici, che modificano i parametri del bilancio termico, fisiologici, cambiamento del calore metabolico, e psicologici derivati dalle esperienze pregresse e dalle aspettative personali che modificano gli stimoli sensoriali[6].
Secondo i ricercatori De Dear e Brager è possibile distinguere tre tipi di adattamento:

1. *Regolazione comportamentale*. Racchiude tutte le modifiche consce o inconsce che intervengono sui flussi di calore e di massa. A questo gruppo fanno parte la regolazione personale, come il cambio d'abbigliamento, l'attività, la postura o le bevande fredde o calde; la regolazione tecnologica, come aprire le finestre o accendere il ventilatore; infine la regolazione culturale, come il riposo o le attività da pianificare.

2.*Regolazione fisiologica*. Comprende tutte le risposte fisiologiche ai comportamenti e all'ambiente. Tale categoria può essere scomposta in adattamento genetico, che deriva da modifiche diventate parte dell'individuo dopo un periodo di tempo che viene esposto a determinate condizioni; e acclimatazione, modifica al sistema di termoregolazione fisiologica in risposta all'esposizione prolungata ad uno stress termico.

3.*Regolazione psicologica*. Quando le percezioni termiche sono alterate dall'esperienza o dall'aspettativa della persona in merito all'ambiente e dall'abitudine.

Il modello analitico che riassume e relaziona tali regolazioni è:

$$T_{co} = a\ T_{out} + b$$

Dove:
T_{co}= temperatura interna di comfort
T_{out} = temperatura media esterna su base mensile
a= costante che lega T_{co} e T_{out}
b= costante che rappresenta la temperatura minima accettabile

La differenza tra comfort termico nel spazi interni e quelli esterni consiste nel fatto che in ambienti chiusi le condizioni sono stabili, mentre all'esterno il microclima urbano varia notevolmente e così anche le condizioni di comfort termico prese in considerazione[7].
Dalle ricerche di Humphreys si constata che in climi caldi, un individuo raggiunge più facilmente le condizioni di comfort se può modificare i sistemi di controllo per raggiungere le condizioni a lui adeguate. Di notevole rilevanza sono gli spazi di transizione, cioè zone a condizioni di confort intermedie tra quelle degli spazi chiusi e di quelli aperti, come i portici, le logge e le verande. La gradualità delle condizioni climatiche favorisce la "gestalt" termica, cioè la ricchezza di sensazioni che associano la percezione poli sensoriale ai meccanismi metabolici e comportamentali di regolazione termica[8].
Questo modello dimostra di essere un approccio bioclimatico al comfort che ben si presta alle strategie della sostenibilità ambientale. I limiti di questi modelli riguardano la difficile osservazione degli indicatori e la necessità di un'elevata conoscenza in ambito di biometeorologia e fisiologia[9].

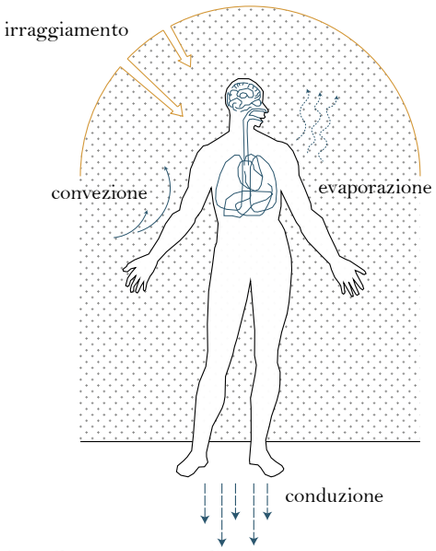


Fig. 4 Scambi di energia trail corpo umano e l'ambiente esterno. Produzione propria.

6.6 Il raffrescamento passivo come necessità

Durante la stagione estiva la radiazione solare raggiunge la Terra con un'intensità maggiore poiché l'inclinazione dell'asse terrestre permette ai raggi solari di colpire la superficie con un'angolazione vicina alla perpendicolare. Secondo le leggi delle trigonometria infatti, la radiazione solare incidente è proporzionale al coseno dell'angolo d'incidenza al piano.
L'elevata radiazione solare aumenta la temperatura interna di un edificio e ne determina il surriscaldamento.
Da sempre l'uomo ha cercato di trovare soluzioni efficaci per ovviare al surriscaldamento degli ambienti interni e le torri del vento in Asia Minore ne sono una prova.
All'inizio del XX secolo furono progettati e installati i primi impianti di condizionamento all'interno dei capannoni industriali, dove il raggiungimento del comfort termo-igrometrico influiva direttamente sulla produttività degli operai. L'ingegnere Willis Carrier nel 1902 propose il primo impianto di condizionamento dell'aria per la Sackett-Wilhelms Lihograping and Publishing Company di Brookling a New York, per risolvere la contrazione ed espansione della carta a causa della variazione di umidità dell'aria[10].
Dal 1945 negli Stati Uniti i sistemi ad aria condizionata entrarono definitivamente in commercio con enorme successo. In contemporaneo si registrò un aumento esponenziale del consumo di elettricità dovuto proprio all'uso dei condizionatori. Nel 1966 si verificarono i primi black-out da condizionamento. Oggi negli USA oltre l'80% delle abitazioni possiede tale sistema, mentre in Giappone si è passati da 3 impianti ogni 100 abitazioni nel 1960 a 150 nel 1990[11].
L'aumento dei consumi di energia elettrica ha pesanti conseguenze ambientali perché la produzione massiva di energia elettrica provoca cambiamenti climatici come l'aumento della temperatura del globo, l'innalzamento del livello delle acque, la modificazione dell'albedo complessiva, ecc.
Gli edifici sono responsabili di circa il 40% dell'energia globale consumata; le emissioni di CO_2 da parte dei sistemi di condizionamento hanno contribuito alle emissioni dei gas serra[12].
Dal punto di vista del comfort termico, è lampante che con l'aumento costante delle temperature, dovuto all'incessante surriscaldamento del globo terrestre, si ricorrerà sempre più in questo tipo di sistemi di raffrescamento dell'aria per ottenere il comfort termico. Se però tali sistemi di raffrescamento saranno

legati al consumo di energie non rinnovabili, allora il circolo vizioso non sarà spezzato fino ad arrivare al collasso ambientale.
Di fronte a questo scenario è chiaro che il ruolo delle strategie bioclimatiche all'interno dell'architettura sta diventando un punto indispensabile per una progettazione volta al benessere dell'uomo e dell'ambiente.

6.7 Ventilazione e sistemi di raffrescamento passivo

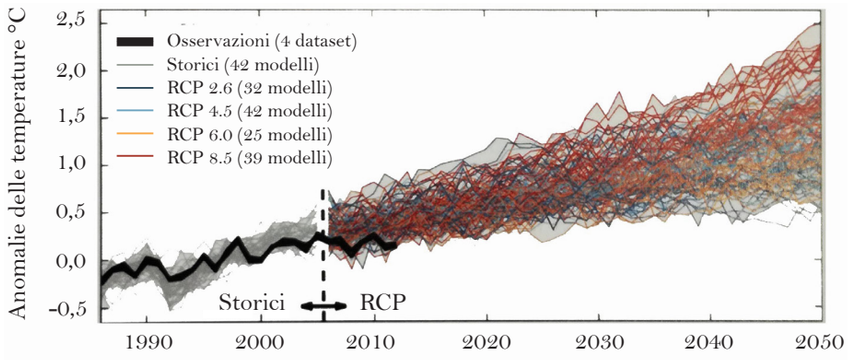
Ventilare significa rinnovare l'aria di un luogo e provvedere alla sua necessità igienica e di benessere. La circolazione dell'aria diminuisce la sensazione di calore in un ambiente surriscaldato e favorisce l'evapotraspirazione del corpo. La ventilazione naturale fa uso solamente della forza del vento e del calore, perciò comporta un più difficile controllo della quantità e delle caratteristiche dell'aria che si immette nell'ambiente. In molti casi aprire una finestra verso l'esterno significa far entrare polveri, pollini, inquinamento stradale, rumori e odori che non possono essere filtrati. Tuttavia esistono soluzioni per ovviare a queste problematiche e soprattutto senza l'utilizzo di fonti energetiche non rinnovabili.

Raffrescamento passivo si basa su metodologie *anti-solari*[13] che prevengono l'accumulo del flusso termico all'interno dell'edificio, attraverso il controllo della radiazione solare e dissipando il calore con pozzi termici naturali.
M. Grosso ne *Il raffrescamento passivo degli edifici* propone la seguente distinzione tra diverse strategie per il raffrescamento dissipativo:

- Raffrescamento microclimatico
- Raffrescamento geotermico
- Raffrescamento evaporativo
- Raffrescamento radiativo

6.7.1 Raffrescamento microclimatico

Tale sistema di basa sull'impiego dell'aria esterna come pozzo termico, in particolare il vento è impiegato per indurre il raffrescamento del corpo umano, della temperatura dell'ambiente e dell'edificio. Affinché questa modalità di raffrescamento si metta in moto è necessario che la ventilazione degli ambienti generi un flusso passante, tra aperture poste su pareti opposte o ad altezze



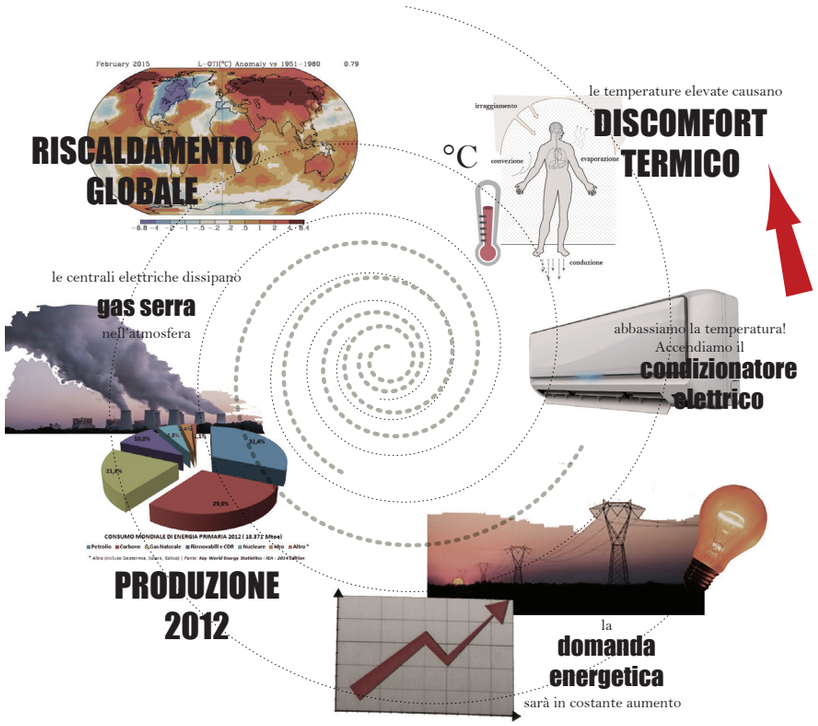


Fig. 5 Quinto rapporto IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) sui cambiamenti climtici, da Aquiletti, 2014. Rielaborazione propria.
Fig. 6 Rappresentazione del ciclo vizioso che porta al surriscaldamento globale. Produzione propria.

differenti. Se l'apertura fosse una, la ventilazione sarebbe *pulsante*[14] e vincolata dalle variazioni della direzione dei venti. I sistemi a ventilazione naturale controllata possono essere diretti o indiretti. Dei primi fanno parte le torri, sia con immissione di vento a caduta che con estrazione a camino. Tale tipologia è molto efficace in condizioni climatiche molto ventilate. I sistemi a ventilazione naturale controllata e indiretta invece presentano un vano, attiguo alla sala da ventilare, da cui si immette o estrae il flusso d'aria. Solitamente il vano è un atrio o il blocco scale.
L'efficacia dei sistemi a raffrescamento microclimatico dipende dalla valutazione degli aspetti climatici, in particolare di temperature e velocità e direzione dei venti.

La *ventilazione naturale pura* si verifica quando c'è una differenza di pressione o di temperatura tra due ambienti confinanti. La differenza di pressione può essere statica o dinamica: con la prima si avrà una ventilazione ridotta. L'azione del vento sulla facciata di un edificio crea un'area ad alta pressione che favorisce l'entrata del flusso dalle aperture che si trovano sulla suddetta facciata.
Due ambienti in contatto tra loro tendono a equilibrare la loro pressione scambiando masse d'aria. Se il vento incide direttamente su una facciata, su di essa si genererà una forte sovra pressione, mentre aree a bassa pressione si troveranno sulle facciate laterali, quella posteriore e sulla copertura. Il flusso d'aria entra dalle aperture poste nelle aree ad alta pressione e fuoriescono in quelle a bassa pressione.
Nel caso in cui l'edificio sia molto alto si creerà una *zona di calma*[15] in corrispondenza della facciata sottovento che riduce la differenza di pressione tra le due facciate. La dimensione della zona di calma dipende da quella dell'edificio: solitamente la zona di calma è alta una volta e mezza l'altezza dell'edificio ed è profonda 4 volte la sua profondità. Se l'edificio è sopraelevato il flusso passerà al di sotto e ciò riduce la zona di calma e favorisce la ventilazione di entrambe le facciate.

La *ventilazione naturale incrociata* è un sistema molto efficace e si genera grazie a due aperture su facciate distanti tra loro, non necessariamente opposte. Si parla di ventilazione incrociata anche quando una delle due aperture si trova ad un'altezza diversa oppure sul piano della copertura.
L'aria calda tende a occupare le parti più alte della stanza e, se ci fosse un'apertura in copertura, l'aria tenderà ad uscire. Così facendo si innesca il tiraggio dell'aria che favorisce l'entrata dell'aria dalla facciata a bassa pressione.

Quando la ventilazione incrociata non è realizzabile, la ventilazione può essere migliorata grazie alla presenza di aggetti sulla facciata che danno luogo a differenze di pressione.
La distribuzione interna e le dimensioni delle aperture condiziona la ventilazione. Quando l'apertura di inlet (entrata dell'aria) e quella di outlet (uscita) si trovano lungo la medesima retta e non ci sono ostacoli tra loro, allora la velocità sarà massima. In caso contrario la velocità diminuirà e si creeranno zone di turbolenza e ricircolo. Anche le dimensioni delle aperture condizionano la velocità del flusso: secondo l'effetto Venturi se il foro d'entrata è più grande di quello d'uscita la velocità sarà bassa in entrata mentre aumenterà in prossimità dell'uscita.

La v*entilazione per estrazione* d'aria è il metodo su cui si basano le torri del vento ad estrazione. La bocca della torre deve essere collocata nella direzione opposta al flusso oppure avere un dispositivo a vela che mantenga perennemente disorientata la bocca della torre. Un esempio architettonico si trova a Kent, in Inghilterra, in alcuni edifici per l'essicazione del luppolo.

La *ventilazione per suzione*, tipica delle torri del vento persiane, inducono le correnti d'aria fresca ad entrare nell'edificio. La bocca della torre quindi si trova nella direzione dei venti prevalenti e ad un'altezza sufficiente per raggiungere le brezze ad alta velocità. Esistono anche torri del vento a più bocche che lavorano sia per suzione che per estrazione. Tali tipologie sono tipiche in zone in cui i venti cambiano spesso direzione.

6.7.2 Raffrescamento geotermico

Il raffrescamento geotermico sfrutta la forte inerzia termica del sottosuolo per dissipare il calore. In un edificio interrato i muri sono a costante contatto, e scambio, con un corpo a condizioni termiche molto più stabili dell'aria. Già a 1 m di profondità l'oscillazione termica giornaliera non è più percepita, mentre quella annuale viene invece annullata a -10 m[16].A questa profondità la temperatura rimane costante per tutto l'anno ed è pari alla temperatura media annua dell'aria. Ciò significa che in estate la temperatura sarà costantemente inferiore a quella esterna mentre in inverno sarà sempre superiore. I fattori importanti sono la profondità alla quale si trova l'edificio e l'estensione della superficie sotterranea, che genera un effetto di *manto isolante*[17]. La profondità, parametro verticale, influisce sulla temperatura, mentre l'estensione, parametro orizzontale, definisce il grado di isolamento dell'edificio e ne aumenta l'inerzia termica.
Esistono due tipi di raffrescamento geotermico: a contatto diretto o indiretto.

I *sistemi a contatto diretto* realizzano lo scambio termico aumentando la superficie dell'edificio a contatto con il terreno. Ciò comporta notevoli conseguenze morfologiche degli spazi. Si può facilmente calcolare la temperatura nel punto medio di un elemento costruttivo sotterraneo, in qualsiasi giorno dell'anno. Il valore sarà pari alla temperatura media del giorno con l'aggiunta di un piccolo incremento:

$$T_{PM} = T_m + \Delta T$$

Tale incremento è in funzione della resistenza termica totale del solaio contro terra e della resistenza termica calcolata alla profondità in cui si può considerare che la temperatura sia stabile annualmente (circa 10 m).

I *sistemi indiretti* invece fanno uso di condotti sotterranei in cui viene immesso un fluido che, se fatto ricolare per un periodo di tempo sufficiente, si raffredda con il contatto con il terreno fino a raggiungere la sua temperatura. L'aria più fredda proveniente dai canali interrati può contribuire alla ventilazione degli ambienti oppure adempiere solo alla funzione di raffrescamento.
Alle condizioni climatiche di Madrid, un condotto di cemento di 30 cm di diametro e una lunghezza tra i 10 e i 20 m, con una velocità dell'aria costante a 2 m/s, al termine del percorso l'aria avrà una temperatura di 5° C in meno rispetto alla sua temperatura in entrata[18].
I principali limiti di questi sistemi sono di tipo economico, oltre che alla necessità di uno spazio esterno dove interrare il condotto e di un ventilatore che mantenga costante la velocità del flusso. Inoltre se si volesse aumentare la portata d'aria si dovrebbe progettare un altro condotto, poiché le dimensioni del condotto non si possono modificare senza rischiare di compromettere l'intero processo.
In generale si può dire che le costruzioni interrate sfruttano tutti i vantaggi dei sistemi di raffrescamento passivo. Un edifico interrato è un edificio bioclimatico per eccellenza, poiché si protegge dalle variazioni climatiche, possiede una grande inerzia termica, consuma poca energia e ha un impatto visivo e ambientale minimo.

6.7.3 Raffrescamento evaporativo

Il raffrescamento evaporativo usa parte dell'energia sensibile dell'aria per far cambiare di stato le particelle d'acqua e cedendo energia, l'aria abbassa la sua temperatura. L'efficacia del raffrescamento evaporativo è molto alta se sono garantite alcune condizioni essenziali quali la presenza di un ambiente secco e un'ade¬guata esposizione della superficie d'acqua alla ventilazione.
Si tratta di una trasformazione adiabatica dove la quantità di calore sensibile e latente rimane costante.
Per far evaporare 1g d'acqua sono necessari 2424 J, che, applicati a 1 m^3 di aria, abbassano la temperatura di 2,2°C[19].

$$1\ g/s = 2424\ J/s = 2424\ W = 2{,}42\ kW$$

In un locale con carica di raffrescamento di 100 W/m^2 questa potenza coprirà una superficie di 24 m^2. Nel caso in cui il locale sia protetto dall'irraggiamento, la sua carica di raffrescamento diminuirebbe a 40 W/m^2 e così si potrebbe coprire una superficie fino a 60 m^2. Ciò significa che l'efficacia del sistema dipende strettamente dalla geometria e dalle dimensioni dell'edificio a cui si applica.

Nell'architettura popolare del Medio Oriente era di uso comune combinare l'effetto raffrescante delle torri del vento con quello evaporativo dell'acqua. Il flusso d'aria veniva catturato dalle torri e nel momento in cui attraversava il condotto veniva a contatto con superfici umide o vasche d'acqua. A contatto con esse, l'aria abbassava ulteriormente la sua temperatura, dissipando energia per innescare il processo di evaporazione.

Il raffrescamento evaporativo è facilmente verificabile nei parchi, nei giardini o in prossimità di bacini e corsi d'acqua.

L'acqua ha una capacità termica superiore al terreno: tende a riscaldarsi più lentamente del terreno e rilascia il calore accumulato altrettanto lentamente. Ciò limita l'effetto dell'escursione termica e attua uno sfasamento temporale delle dinamiche di scambio termico. L'acqua quindi è un mitigatore termico che stabilizza le temperature e aumenta l'umidità. Tra la massa d'acqua e il costruito si genera uno schermo che attenua l'intensità dei fenomeni ambientali.

Secondo l'Istituto di Biotecnologia del Consiglio Nazionale delle Ricerche

(Cnr) di Firenze (2005) le aree verdi variano il clima e la temperatura dai 3° ai 5 °C e l'effetto aumenta più o meno linearmente con la dimensione dell'area. La vegetazione agisce sulla temperatura dell'aria sotto forma di calore sensibile e latente: aumentando il primo si ha una temperatura percepita più alta, aumentando invece il secondo la temperatura percepita diminuisce grazie al fenomeno dell'evapotraspirazione.
L'evapotraspirazione agisce principalmente in climi a bassa umidità, alta ventilazione e temperatura; con tale fenomeno si indica l'abbassamento della temperatura dell'aria circostante dovuto al contatto con la superficie fresche delle foglie. Inoltre il manto di foglie emette meno radiazioni all'infrarosso e quindi riduce la temperatura radiante media dell'ambiente.
Un altro dei benefici della vegetazione è che umidifica l'aria immettendo il vapore acqueo prodotto dall'evapotraspirazione. Essa innalza l'umidità relativa anche del 20%, soprattutto nelle ore serali. Quest'effetto è evidente quando la scala della vegetazione è elevata (scala urbana o territoriale), anche se situazioni analoghe si verificano all'interno delle corti interne degli edifici, grazie alla presenza dei limiti verticali degli edifici.

Un albero è in grado di evaporare 500 kg d'acqua all'anno ogni metro quadrato di superficie, ciò presuppone la forza di 1212 MJ/m^2 all'anno, che equivale a una potenza di raffrescamento media di 40 W/m^2 di superficie vegetale[20].

6.7.4 Raffrescamento radiativo

Per eliminare direttamente la quantità di energia di un ambiente, e quindi ridurre la temperatura, è necessario il contatto con un corpo freddo, la cui temperatura sia sufficientemente bassa rispetto a quella a cui vogliamo arrivare, e la cui massa sia abbastanza estesa da non modificarne la temperatura durante lo scambio. I corpi che possiedono tali caratteristiche sono l'aria che ci circonda (raffrescamento microclimatico o convettivo), il terreno (raffrescamento geotermico o conduttivo) e la volta celeste (raffrescamento radiativo o radiante). Nel caso del raffrescamento radiante il corpo che entra in gioco è la volta celeste notturna, che si mantiene perennemente a una temperatura bassissima. Perché il sistema di raffrescamento notturno sia efficace sono necessarie le condizioni climatiche adeguate, come la nitidezza atmosferica, l'assenza di contaminazioni e di nubi. In clima desertici questo fenomeno è verificabile attraverso la fortissima escursione termica giornaliera.
In termini architettonici le superfici più adeguate a scambiare con la volta

celeste sono i tetti piani che, durante la notte, cedono calore, raffreddandosi. Con tetti verdi o ricoperti di uno strato d'acqua, l'effetto si amplifica notevolmente. Anche i patii interni traggono beneficio dal raffrescamento radiativo: qui l'aria freddo della notte si mantiene più a lungo e mantiene freschi i locali che lo circondano.

Legenda schema di ventilazione:

1 ventilazione integrata
2 ventilazione parete-copertura
3 ventilazione con portico
4 ventilazione a parete ad altezze diverse
5 ventilazione incrociata ad altezze diverse
6 ventilazione con cupola
7 ventilazione con torre del vento a un condotto
8 ventilazione con torre del vento a un condotto di notte
9 ventilazione con torre del vento e stanza seminterrata
10 ventilazione con torre del vento a condotto sotterraneo
11 ventilazione con torre del vento a doppio condotto
12 ventilazione con torre del vento e cupola
13 ventilazione con torre del vento e vasca evaporativa
14 ventilazione con torre del vento e sistema di umidificazione
15 ventilazione con torre del vento e doppio sistema di umidificazione
16 ventilazione con patio
17 ventilazione con patio di notte
18 ventilazione con patio e torre del vento
19 ventilazione con torre del vento al centro
20 ventilazione con torre del vento ed edificio a doppio livello
21 ventilazione con torre del vento a stanze concatenate
22 ventilazione con torre del vento a sunzione ed estrazione
23 ventilazione con torre del vento a sunzione ed estrazione e stanza interrata
24 ventilazione della cisterna d'acqua con sistema di raffrescamento evaporativo

Note:

1 definizione da M. Grosso, Il raffrescamento passivo degli edifici, 1997
2 Strazzabosco, 2014-2015
3 cioè delle superfici che racchiudono l'ambiente.
4 che agisce sulle perdite per convezione.
5 Butera, 1995
6 ISO 7730, 1994
7 studio RUROS, Unione Europea, 2012
8 Grosso, 1997
9 Napoleone 2014
10 Butera, 2007
11Butera, 2007
12 Aquiletti, 2014
13 termine presente in Passive Cooling, Cook, 2000
14 Aquiletti, 2014
15 termine usato da Scudo in Almanacco dell'architetto, 2012
16 Strazzabosco, 2014-2015
17 termine usato da Neila in Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible, 2004
18 Neila, 2004
19 Neila, 2004
20 Neila, 2004

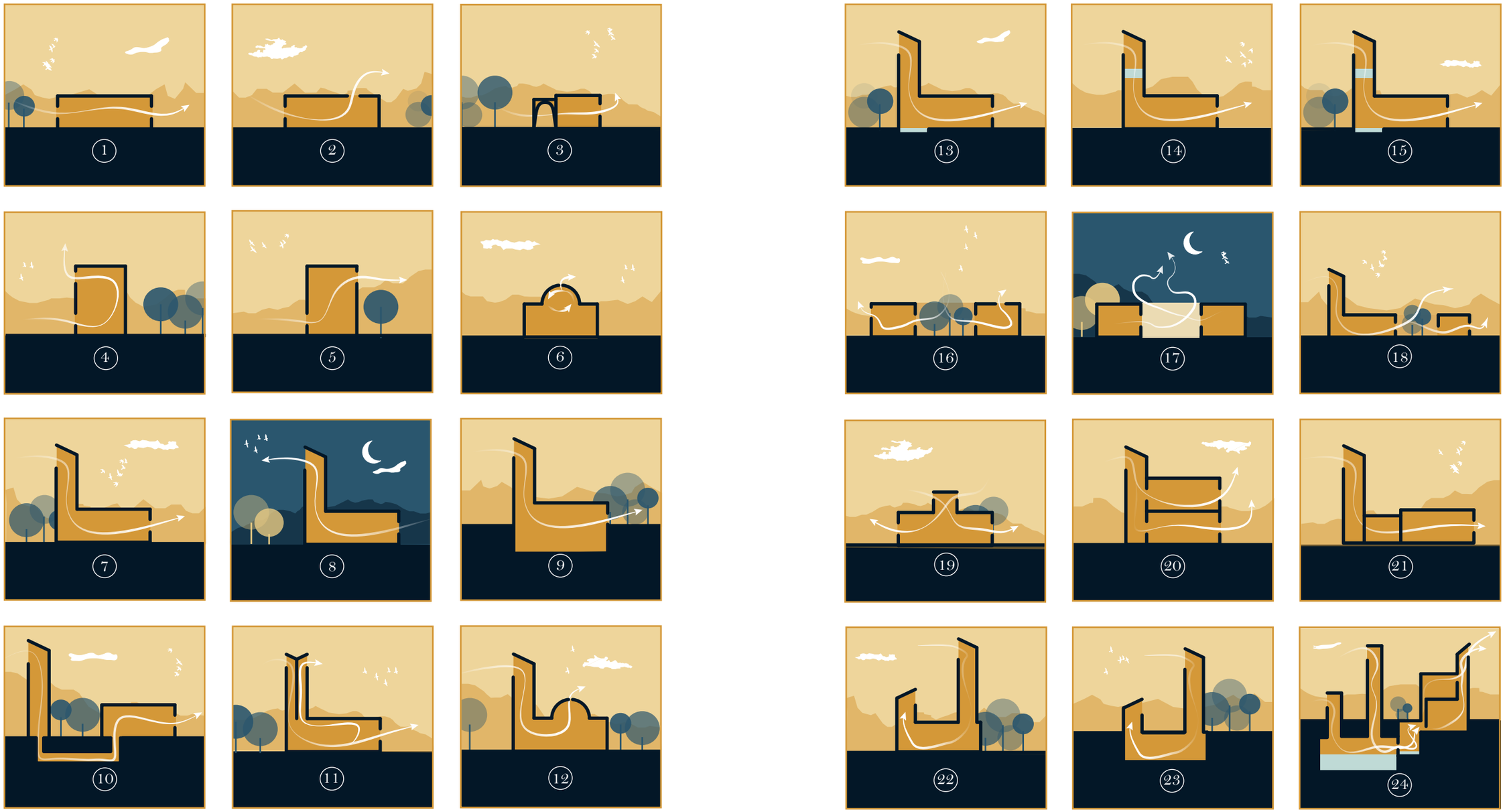


Fig. 7 Schemi di ventilazione naturale. Produzione propria.

Bibliografia:

F. Aquiletti, *Il raffrescamento evaporativo passivo applicabilità climatica e integrazione architettonica*, Tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino, 2014

F. Butera, *Architettura e Ambiente*, Etaslibri, Milano, 1995

F. Butera, *Dalla caverna alla casa ecologica*, Ambiente, Milano, 2007

J. Cook, *Passive Cooling*, The MIT press, Cambridge, 2000

E. Erell, D. Pearlmutter, T. Williamson, *Urban microclimate: designing the spaces between buildings*, Routledge, 2012

M. Grosso, *Il raffrescamento passivo degli edifici. Concetti, procedimenti architettonici, criteri progettuali, metodi di calcolo e casi studio*, Maggioli editore, Rimini, 1997

S.Morteza Moossavi, *Passive Cooling Systems for Hot-Arid Climate in Islamic Iranian Architecture*, International Conference on Islamic Arts and Architecture 5th Edition, New Delhi, 2011

F. Napoleone, *L'analisi del comfort termico nell'ambiente esterno: un nuovo campo di indagine per una città*, Tesi di dottorato, Politecnico di Torino, 2014

F.J. Neila, *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*, Madrid, 2004

E. Sapei, *La vegetazione e il comfort ambientale negli spazi aperti urbani*, Tesi di Laurea magistrale in Architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino, 2015

G. Scudo, *Ambiente esterno*, in *Almanacco dell'Architetto*, Proctor Edizioni, Bologna, 2012, pag, 900-971

G. Strazzabosco, *Analisi energetica ed economica di sistemi a pompa di calore geotermica per la climatizzazione di edifici*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica, Università degli Studi di Padova, 2014-2015

Capitolo 7

Analisi fluidodinamica

"Dopo una breve introduzione dei parametri fondamentali di fluidodinamica, indispensabili per comprendere le diverse fasi, si è preso in analisi lo studio del professor Hamid Montazeri dell'Università di Yazd. Montazeri e il suo gruppo hanno analizzato in galleria del vento il comportamento di una torre del vento a doppio condotto, realizzando un modello in scala della scuola Kharmani di Yazd.
Al fine di validare le prestazioni del nuovo software CFD VENTO AEC, i risultati sperimentali dello studio di Montazeri sono stati confrontati con quelli ottenuti con il nuovo programma di calcolo.
Dal momento in cui la verificazione è andata a buon termine allora il software è stato utilizzato per le analisi progettuali."

7.1 Cenni di fluidodinamica

7.1.1 Il flusso (o portata)

Il flusso è il volume, o la massa, di fluido che attraversa una superficie in un'unità di tempo e si misura in m3/s.

$$Q=Av$$

Dove:
Q= flusso
A= area [m^2]
v= velocità [m/s]

L'equazione di continuità afferma che in un tempo Δt entra un volume A1Δx1 ed esce un volume A2Δx2 che devono coincidere.
Il fusso si divide in laminare (stazionario) e turbolento: nel primo le linee di flusso non si incrociano mai, nel secondo invece si hanno fenomeni come vortici e zone di ricircolo in cui le linee di flusso si incrociano. In un flusso turbolento la resistenza aumenta, perciò è da evitare.

7.1.2 Linee di flusso

Sono linee la cui tangente è uguale in ogni punto alla velocità del liquido. Le linee di flusso indicano un campo vettoriale in cui ogni vettore è associato ad ogni punto di una regione dello spazio.

7.1.3Effetto venturi

In un tubo a sezione variabile A, la pressione diminuisce dove la sezione diminuisce.
Il rapporto pressione-velocità è inversamente proporzionale. Inoltre dove la velocità aumenta le linee di flusso si infittiscono.

7.1.4 Numero di Reynolds

$$Re= \rho VD/\mu$$

Dove:
ρ = densità [kg/m^3]
V= velocità
D= lunghezza caratteristica
μ = viscosità

Il numero di Reynolds (Re) è un valore adimensionale proporzionale al rapporto tra forze d'inerzia e forze viscose. Viene definito numero di Reynolds critico il valore in corrispondenza del quale si passa da regime laminare a turbolento. In particolare per bassi valori di Re si sta in regime laminare (o stazionario), mentre ad alti valori di Re si ha un regime turbolento.

Re<2,1 regime laminare
Re>4 regime turbolento
2,1<Re<4 zona di transizione

Tale valore critico dipende dalla forma del corpo e dalla sua posizione rispetto al flusso, nonché dalla sua velocità.
Un fluido a regime laminare ha velocità minore rispetto allo stesso fluido a regime turbolento.
Il rapporto tra la pressione in un punto e il suo numero di Reynolds è uguale alla pressione in qualsiasi altro punto per il suo numero di Reynolds. Quindi la pressione in un punto x può essere calcolata come:

$$P_x=Re_x\ P_1/Re_1$$

Ciò significa che se due punti hanno uguale numero di Reynolds, avranno pressione coincidente.
Tutto ciò però può essere considerato vero solo se non si verificano scambi termici: in presenza di fenomeni come l'effetto camino queste relazioni non sono più verificate.

7.1.5 Perdite di carico

Le perdite di carico si dividono in distribuite e concentrate. Le perdite distribuite dipendono dalla scabrosità delle superfici che ne aumentano l'attrito; questo tipo di perdite sono quindi diffuse e pressoché inevitabili.

Le perdite concentrate invece sono puntuali e dipendono dalla forma del condotto, da ostacoli che il flusso incontra nel suo percorso e da cambiamenti e diramazioni della sezione del condotto.
Il coefficiente di fuoriuscita Cd indica di quanto diminuisce il flusso tenendo in considerazione le perdite di carico.
Solitamente i valore di Cd si aggirano intorno a 0,5 anche se verificare il suo valore reale è complicato e solitamente si necessita un approccio semi-empirico.
È detta a*rea di ricircolo*, lo spazio, in prossimità di ostacoli o variazioni di sezione, in cui si generano ricircoli d'aria e che provocano le perdite di carico concentrate.

7.1.6 Coefficiente di pressione

$$Cp=(p-p_s)/(1/2pV_{ref}^{\ 2})$$

Dove:
p=pressione superficiale (misurata con sensori di pressione posizionati in prossimità delle aperture e al di sotto dei condotti)
ps = pressione statica controcorrente
$1/(2pV_{ref}^{\ 2})$ = pressione dinamica

7.2 La validazione

7.2.1 Il riferimento sperimentale

Il professor H. Montazeri, docente di Environmental Engineering, Civil Engineering e Mechanical Engineering presso l'università di Leuen (Belgio), in collaborazione con l'università di Yazd (Iran), ha avviato una ricerca sulle performance delle torri del vento a uno e due condotti. In particolare lo studio ha avuto diverse fasi: la fase sperimentale in cui è stato studiato il comportamento del vento posizionando un modello in scala della scuola Kharmani a Yazd in galleria del vento; la seconda analisi è stata realizzata con un software di fluidodinamica che ha consentito di simulare virtualmente le stesse condizioni del test sperimentale. Nella terza fase è avvenuto il confronto tra i risultati del test sperimentale in galleria del vento e quello analitico con il software CFD.
Il caso preso in esame presenta un edificio con una torre del vento a doppio condotto, collegato direttamente a una stanza con una finestra sul lato opposto a quello della torre. In questo studio il modello della torre è costituito da due canali uguali attaccati tra loro schiena a schiena.
Il modello è realizzato in legno e al suo interno sono stati installati, sulle superfici di ogni canale, 23 indicatori di pressione al fine di misurare la pressione statica in ogni punto. Le tre superfici sopravento sono nominate Sw(L), Sw(P) e Sw(R) e sono rispettivamente la superficie di sinistra, quella proiettata e quella di destra.
Analogamente le superfici sottovento sono Sl(L), Sl(P) e Sl(R).

Gli studi sperimentali sono stati condotti in galleria subsonica a ciclo aperto nel laboratorio di termodinamica della Scuola di Ingegneria Meccanica di Yazd. Questa galleria del vento è disegnata per test sperimentali di ventilazione naturale e presenta altezza di 46 cm, larghezza 46 cm e lunghezza di 360 cm. In accordo con le dimensioni del modello e la sezione della galleria del vento, il modello produce un'ostruzione del 5,5% all'interno della galleria, perciò sui dati ottenuti non si è applicata nessuna correzione.
I test svolti in galleria sono stati svariati, uno dei quali prevedeva l'uso di fumogeni per visualizzare nel migliore dei modi la direzione del flusso. In questo caso il modello è stato esposto a una velocità dell'aria di 3 m/s.
I risultati, confermati dal test con i fumogeni, indicano che ciascuna apertura

può catturare o sfiatare aria; per questo motivo tubi Pitot e statici sono stati posizionati sia nel punto più alto che in quello più in basso dei canali. Il modello è stato realizzato in modo da poter ruotare per poterlo testare nelle diverse angolazioni del vento.
Durante lo studio, la direzione del vento venne variata da 0°-90° con intervalli ogni 15° e il vento ha sempre velocità uniforme a 20 m/s.
I tubi Pitot inseriti nella torre hanno rilevato la pressione totale e la pressione statica controcorrente i quali valori hanno permesso di calcolare il coefficiente di pressione.
Per determinare la quantità di flusso d'aria entrante nei condotto sono stati posizionati del tubicini in acciaio inossidabile con sezione 1,2 mm. In totale i tubi posizionati sono 20 Pitot e 11 statici.
Per determinare in modo corretto il valore di flusso all'entrata del condotto è necessario stimare il coefficiente di fuoriuscita (Cd) che indica di quanto il valore del flusso ideale, calcolato sulla base della sezione reale del condotto, si discosta dal flusso effettivo.
Il coefficiente di pressione (Cp) è stato stimato conducendo i test alle varie angolazioni di flusso sia sulla superficie della bocca sopravvento, controvento e sulla finestra.

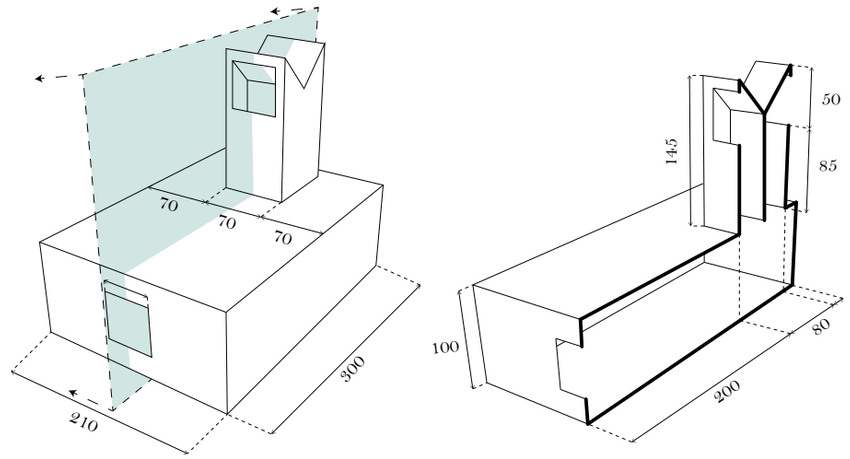
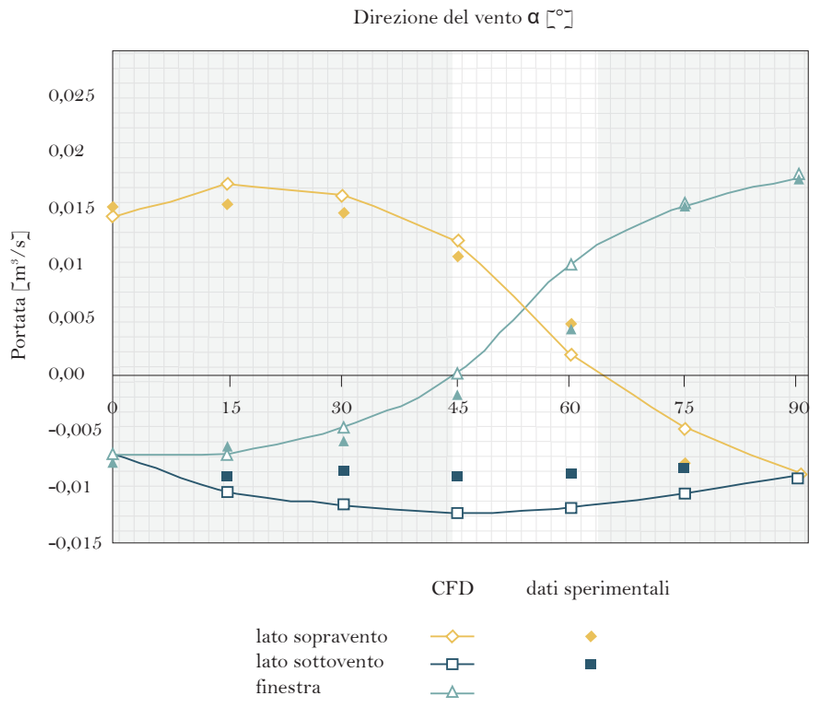


Fig. 1 Geometria e dimensioni del modello analizzato, da Montazeri, 2010.Rielaborazione propria.



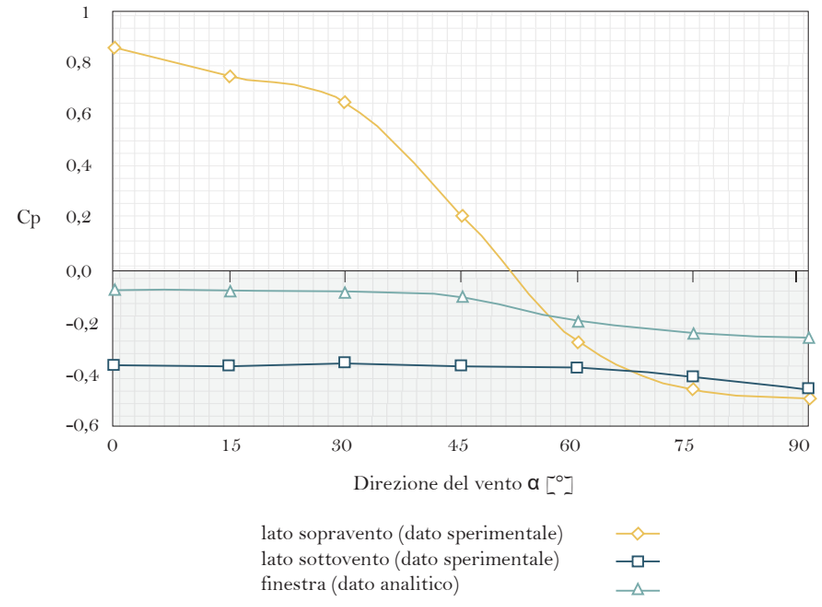


Fig. 2 Portata d'aria alla bocca sul lato sopravento, sottovento e sulla finestra dell'edificio, dati da Montazeri, 2010. Rielaborazione propria.
Fig. 3 Valore del coefficiente di pressione Cp sulla bocca sopravento, sottovento e all'interno dell'edificio, dati da Montazeri, 2010. Rielaborazione propria.

7.2.2 Il modello CFD

Il software impiegato per l'analisi si basa su alcune fondamentali proprietà fisiche quali il calore specifico [J/kgK], la viscosità [kg/ms], il numero di Prandtl [-], il numero di Schmidt [-] e la densità [kg/m3] e sulle equazioni di stato che descrivono lo stato della materia e forniscono le relazioni tra le variabili di stato come temperatura, pressione, volume, energia interna, ecc, …
Il modello di turbolenza impiegato è lo SPALART-ALLMARAS.
La simulazione può avvenire in setup Indoor oppure Outdoor a seconda se l'area di maggior interesse è quella all'interno o all'esterno dell'edificio.
I passaggi per impostare l'analisi fluidodinamica consta di 5 fasi:

-Modellazione
-Generazione della griglia
-Definizione delle condizioni al contorno
-Immersione
-Lettura dei risultati

La prima fase consiste la realizzazione di un modello 3D dell'ambiente da sottoporre all'esame: tale modello deve essere costituito da superfici semplici e poggiare sul piano z =0. Una volta completato, viene importato nel programma e qui si stabiliscono le dimensioni del dominio proporzionate al modello.
La seconda fase consiste nella generazione della griglia: si tratta di una maglia ortogonale che si infittisce nei punti in cui la geometria appare più complessa. Ad ogni superficie importata viene assegnato un grado di raffinamento della griglia, a seconda della geometria e dei punti di maggior interesse della simulazione.
Le condizioni al contorno stabiliscono lo stato delle superfici che definiscono il dominio; esse rappresentano l'ambiente all'interno del quale si vuole misurare l'evento.
Nel momento in cui il calcolo viene lanciato si passa nella fase dell'immersione. Durante questa fase, che avrà durata variabile a seconda della complessità della simulazione, avvengono veri e propri calcoli matematici. Al termine del processo i risultati ottenuti saranno visualizzati nell'interfaccia. Nel nostro caso i dati che più sono interessanti sono quelli di velocità media [m/s], temperatura [°C] e di portata [m3/s], visibili sia nel modello che con tabelle di dati.

7.2.3 Il confronto dei risultati

Per meglio simulare le stesse condizioni del caso di Montazeri si sono calcolate le stesse condizioni sia un modalità Outdoor che Indoor. Fin da subito si è constatato che il setup Indoor sarebbe stato più vicino alla simulazione iraniana; tuttavia per avviare la simulazione Indoor è necessario sapere con esattezza le aree di inlet e le aree di outlet. Perciò la simulazione Indoor si è potuta effettuare solo per angolazioni comprese tra 0° e 45°. Il passo successivo è stato quello di verificare se le simulazioni Indoor e Outdoor avessero un buon grado di approssimazione tra loro.
Le simulazioni Outdoor sono state effettuate per gli angoli 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°.
Ad angolazioni comprese tra 0° e 45°, la torre del vento porta brezze leggere all'interno della stanza e il condotto sopravento presenta tratti a velocità elevata. Sotto i condotti la brezza percepita è forte. Il flusso è entrante dal condotto sopravento e uscente dalla finestra e dal condotto sottovento.
Con α =60°, l'effetto nei condotti si attenua, in stanza l'aria è ferma. Il flusso entra dal condotto sopravento ed esce dalla finestra e dal condotto sottovento.
Quando 75°< α <105°, l'aria è ferma sia nei condotti che nella stanza. La torre del vento non lavora. A queste angolazioni la torre del vento presenta le peggiori prestazioni. A 75° infatti il flusso entra dal condotto sopravento ed esce da quello sottovento senza circolare nella sala (short circuiting).
A 90° e al 105° il flusso entra dalla finestra ed esce da entrambi i condotti.
Con α =120° la brezza leggera entra nel condotto sottovento mentre nella stanza l'aria è ancora ferma. Il flusso è entrante dalla finestra e uscente dai condotti.
Per un'angolazione di 135° una brezza forte entra in entrambi i condotti mentre nella stanza l'aria è ancora ferma. Il flusso entra dal condotto sopravento (destra) ed esce da quello sottovento (sinistra).
Con 150°< α <165° si ha una brezza forte in entrambi i condotti mentre nella stanza l'aria è pressoché ferma. Il flusso entra dalla finestra e dal condotto sopravento (destra) mentre esce dal condotto sottovento (sinistra).
Infine quando α =180°, la circolazione dell'aria si è ristabilita, in prossimità della finestra si percepisce una brezza leggera entrante. Il flusso esce solo dal condotto sottovento.

Analizzando i risultati delle analisi Indoor si può dire che con α =0°, il condotto sopravento presenta velocità elevate e all'interno della stanza si per-

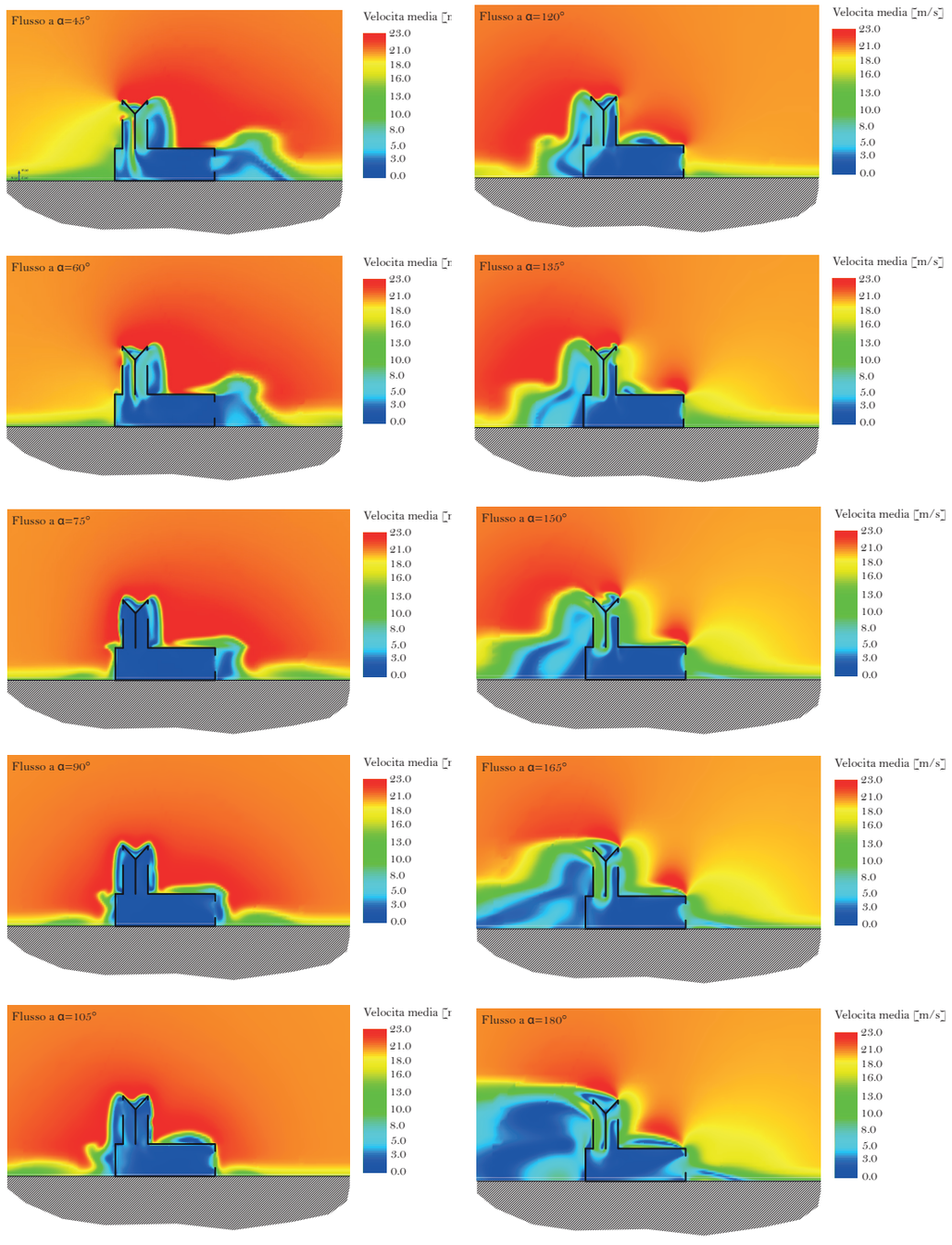
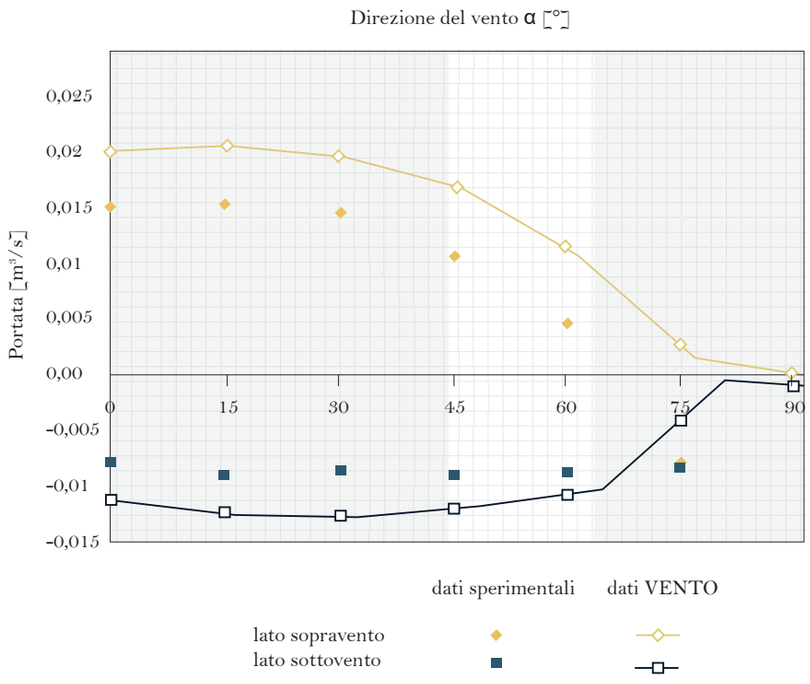


Fig.4 Simulazioni in modalità Outdoor alle diverse angolazioni. Produzione propria.

cepisce una brezza leggera. Le due analisi indoor e outdoor, presentano una buona approssimazione internamente alla stanza e nei condotti. I risultati si discostano solo esternamente.
Negli angoli a 15° e a 30° la torre del vento presenta buone prestazioni, seppur la velocità all'interno dei condotti sia minore che con un'inclinazione di 0°. Anche a queste angolazioni l'approssimazione tra analisi Indoor e Outdoor è buona.

Sebbene l'andamento qualitativo sia confermato, la mancanza di dettagli specifici riguardo alle impostazioni dello studio sperimentale ha portato alla sovrastima della portata entrante di circa il 25%. Tale stima però può ritenersi un valido punto di partenza per un possibile sviluppo futuro.



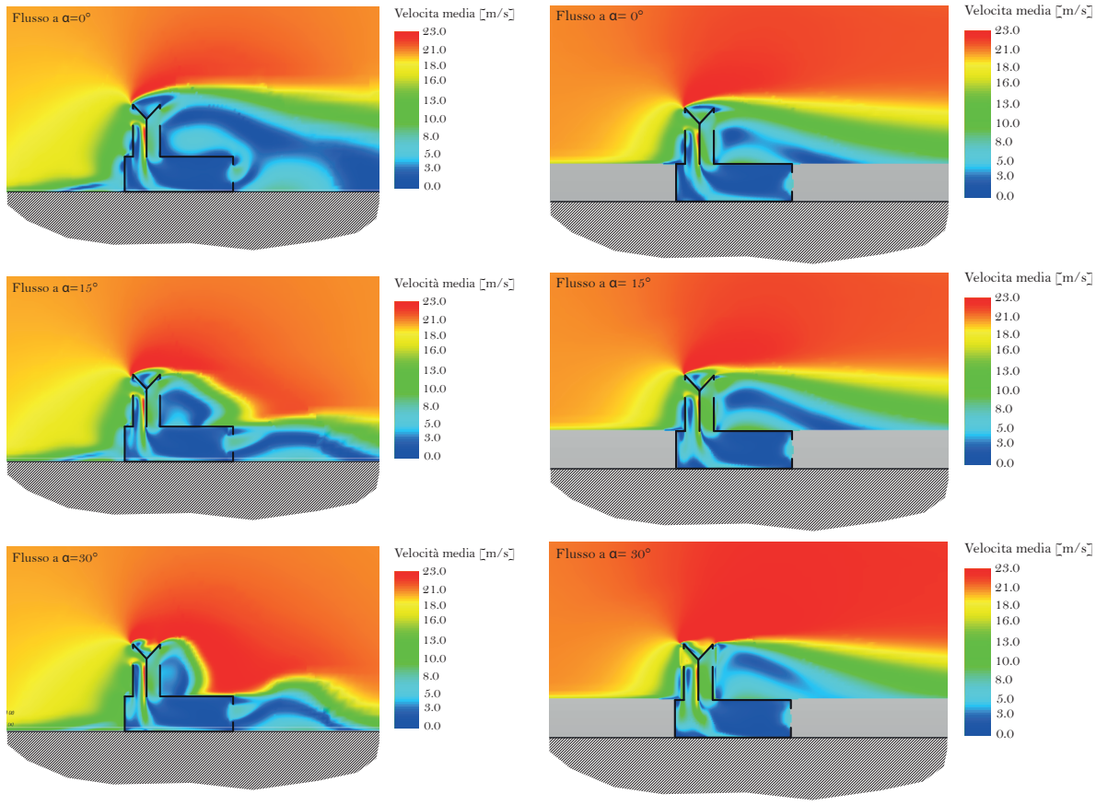


Fig. 5 Confronto dei dati di portata d'aria alla bocca sul lato sopravento e sottovento. Dati sperimentali di Montazeri. Rielaborazione propria.
Fig. 6 Simulazioni in modalità Outdoor a sinistra e Indoor a destra, alle angolazioni 0°, 15° e 30°. Produzione propria.

Bibliografia

D. Citrini, G. Noseda, *Idraulica*, Seconda edizione, Casa editrice ambrosiana, Milano. 1987

J. Cook, *Passive Cooling*, The MIT press, Cambridge, 2000

M. Grosso, I*l raffrescamento passivo degli edifici. Concetti, procedimenti architettonici, criteri progettuali, metodi di calcolo e casi studio*, Maggioli editore, Rimini, 1997

H. Montazeri, R. Azizian, *Experimental study on natural ventilation performance of a two-sided wind catcher*, Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, 2008

H. Montazeri, F. Montazeri, R.Azizian, S.Mostafavi, T*wo-sided wind catcher performance evaluation using experimental, numerical and analytical modelling*, Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, 2010

Seyed Morteza Moossavi, *Passive Cooling Systems for Hot-Arid Climate in Islamic Iranian Architecture*, International Conference on Islamic Arts and Architecture 5th Edition, New Delhi, 2011

Capitolo 8

Il progetto

"A coronare la tesi c'è il progetto per un hammam nel centro storico di Yazd. La massiccia presenza di vuoti urbani è dimostrazione della lenta e continua decadenza del centro storico che tuttavia possiede un patrimonio architettonico, artistico e culturale unico. Un hammam non è solo uno spazio di benessere in cui ci si prende cura di se stessi e della propria salute, ma anche uno spazio sociale di aggregazione. Il complesso presenta 9 torri del vento, ognuna delle quali ha caratteristiche specifiche in base all'ambiente che serve."

8.1 Introduzione

L'obiettivo di questa tesi sta nell'unire la fluidodinamica e la progettazione al fine di estrapolare una forma, un edificio o uno spazio, capaci di tradurre in architettura i risultati numerici dei calcoli fisici. Quello che viene presentato non ha la pretesa di essere un progetto realizzabile economicamente o politicamente, ma vuole essere un punto di partenza, uno spunto su quello che significa unire l'architettura tradizionale e la storia di un luogo, le caratteristiche climatiche, il genius loci, il vento, e la nuova tecnologia. Questi sono gli ingredienti fondanti della mia progettazione.

Come si è già spiegato nel capitolo 5, le problematiche urbane attuali della città di Yazd sono dovute in gran parte agli sventramenti del centro storico degli anni '70. Essi hanno causato una brusca interruzione dei tessuto storico che non rispondeva più alle esigenze della mobilità moderna. Da qui si registrò una continua migrazione dal centro verso le periferie urbane, dando inizio al processo di vuotamento del centro storico della città. Tuttavia la città di Yazd geograficamente si trova al centro di un deserto che la mantiene isolata dai grandi poli urbani iraniani e la costringe a relazionarsi con il clima sotto ogni punto di vista.
Nelle periferie, per ricreare un ambiente vivibile, si sono adottate soluzioni economicamente e ambientalmente dispendiose e ciò comporta uno spreco delle risorse elettriche che gravano sul bilancio già pesante dell'intero paese. I nuovi quartieri periferici sono stati pensati e progettati secondo soluzioni occidentali che mal rispondono al clima locale. I metodi costruttivi e le tecniche bioclimatiche tradizionale vengono via via dimenticate.
In quest'ottica rivitalizzare il centro storico è una scelta doverosa non solo per motivi culturali e storici ma anche ambientali: il centro storico è infatti la zona più protetta dai venti sabbiosi che soffiano da nord-ovest. Inoltre il tessuto urbano ostacola i venti sabbiosi e favorisce le aree agricole a sud, che altrimenti non esisterebbero.
A livello ambientale quindi il centro storico è il punto migliore della città; presenta già tutte le caratteristiche necessarie per creare un ambiente di qualità. Intervenire sul tessuto storico di Yazd significa innescare un processo di ammodernamento che potrebbe rindirizzare il flusso attuale. Negli anni '70 gli sventramenti avevano proprio lo scopo di rendere maggiormente agibile il centro con i mezzi a motore. Poi a causa dei conflitti e dell'instabilità politica

di cui ha sofferto il paese, tale processo urbano si è interrotto, lasciando solo profondi solchi nel cuore della città.
Oggi il centro storico di Yazd si presenta in lenta decadenza: crolli ed aree abbandonate sono sempre più numerose e la mappatura della zona ha permesso di individuare quelle aree ormai inutilizzate che però possiedono un alto valore strategico perché strettamente collegate ai massimi poli culturali come la moschea del Venerdì, il Bazaar Khan, la Torre dell'Orologio, il famoso complesso Amir Chakhmaq e il giardino Dolat- Abad.

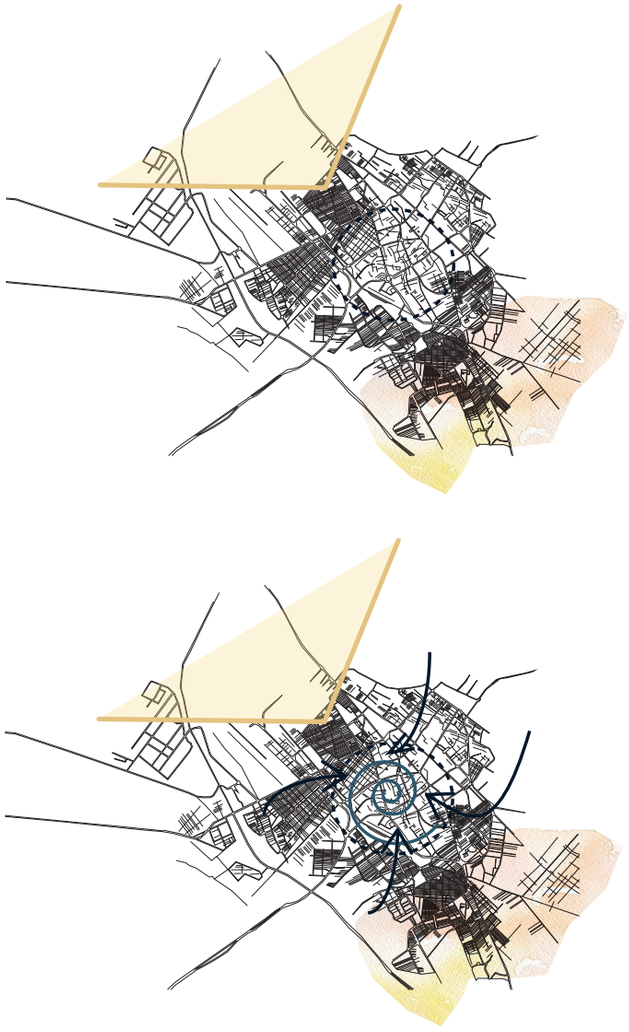
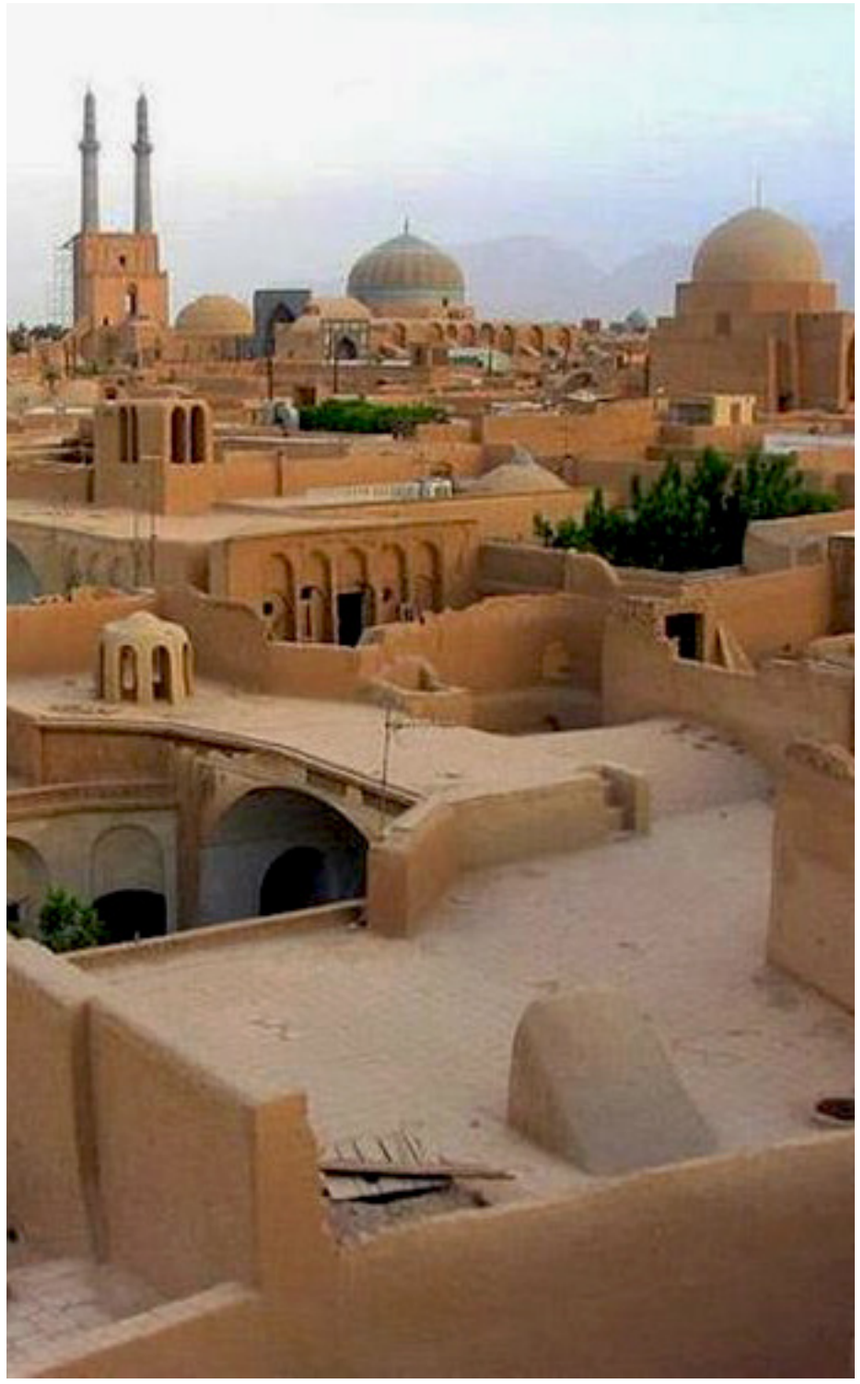


Fig.1 Flussi urbani della città di Yazd. Produzione propria
Fig. 2 Paesaggio dai tetti di Yazd. Foto dal sito travel.allwomenstalk.com, consultato il 25/1/18.



Legenda:

- centro storico
- lotti periferici
- parco/zona verde
- vuoti urbani
- possibili aree di progetto
- punti di riferimento
- fiume
- qanat

a Moschea del Venerdì
b Bazaar Khan
c Torre dell'orologio
d Complesso Amir Chakhmaq
e Giardino Dolat-Abad

0 100 200 500 1000 m

8.2 La scelta del lotto

Il centro cittadino presenta tutte la caratteristiche della città araba e persiana; come è stato descritto nel capitolo 3, i fulcri della vita sociale risiedono nella moschea del Venerdì e la sua grande pizza su cui si affaccia, nel *bazaar*, centro del commercio e delle attività artigianali locali, nella *medersa*, la scuola di culto. Per completare il quadro manca l'*hammam*, luogo di relax e cultura, per questo motivo tra i lotti dismessi e vuoti a causa dei crolli avvenuti negli anni, se n'è scelto uno che possieda le caratteristiche ottimali per il progetto.

I filtri messi in atto per l'individuazione del lotto sono:

-la dimensione coerente con il progetto
-l'integrazione con il tessuto urbano
-la creazione di un polo attrattivo
-buona esposiozione ai venti favorevoli
-il passaggio di un canale qanat al di sotto del lotto

I lotti presi in esame sono 7 e possiedono sia una buona accessibilità, cioè si trovano nelle vicinanze di una via principale, che un canale qanat che scorre al di sotto di essi.
Nella tabella quindi sono state riportate le altre caratteristiche filtro e, dopo un'attenta analisi, si è scelto il lotto numero 6. Si tratta di un'area dismessa di 4736 m² adiacente a una via abbastanza trafficata, ma, nello stesso tempo l'area è ben integrata al tessuto urbano storico, con una distanza tra i fulcri tale da poter creare a sua volta un adeguato raggio d'influenza.

8.3 Dalle terme romane agli hammam mediorientali

Le terme romane sono formate da una serie di ambienti posti in sequenza l'uno dopo l'altro.
La prima sala è quella dell'apodyterium, ovvero lo spogliatoio; solitamente è ha pianta quadrata o rettangolare con un abside ed è coperta da volte a botte o a crociera. L'ambiente non è riscaldato ma presenta una fontana centrale.
Il secondo elemento è il calidarium, ambiente riscaldato a pianta centrale con una grande vasca con nicchie e vasche minori a temperature più basse. L'orientamento è sud-ovest per sfruttare il calore dei raggi solari che entrano dalle grandi aperture arcate.

	1	2	3	4	5	6	7
aree							
immagini da google maps							
m²	1.103 m²	4.593 m²	777 m²	7.640 m²	2.002 m²	4.736 m²	5.477 m²
dimensioni coerenti con il progetto		●				●	●
integrazione tessuto urbano	●			●	●	●	
creazione di un polo attrattivo	●					●	●
buona esposizione a venti favorevoli		●		●	●	●	

Figura 3 (pagina precedente) Mappa del centro storico di Yazd. Produzione propria
Figura 4 Tabella per la scelta del lotto ottimale. Produzione propria, ortofoto da googlemaps.it

A seguire viene il tepidarium, anch'esso a pianta centrale ma di dimensioni più contenute. Il frigidarium è la sala più estesa coperta da maestose volte a crociera. Essa presenta numerose vasche d'acqua fredda e nicchie. Il frigidarium è il luogo d'incontro, passeggio e smistamento, si trova esattamente al centro dell'intero complesso e comunica direttamente con tutti gli altri settori.
La natatio è un vano rettangolare esterno, delimitato da alti muri.
Per ultima c'è la palestra che occupa il cortile interno porticato, collegato a vari ambienti interni.
Il piano superiore presenta gli ambienti di servizio, i bagni riservati e le terrazze solarium.
All'interno del complesso spesso sono annessi ambienti di cultura, come biblioteche e auditorium, e di relax, come sale espositive e giardini.
L'intero edificio delle terme presenta ricche decorazioni, mosaici e pietre preziose. L'intreccio degli spazi chiusi e aperti si fonde in un equilibrio planimetrico e altimetrico preciso. [7]
Gli ambienti principali si susseguono verticalmente lungo l'asse centrale mentre le sale minori sono disposte lateralmente e in modo simmetrico rispetto all'asse centrale. L'impianto disegna un percorso anulare, in modo da non dover mai ripercorrere gli ambienti superati. [8] I criteri di duplicazione e simmetria, assieme alla totale assenza dei prospetti esterni, rendono questa tipologia unica e ben identificabile nel tessuto cittadino. Le forme architettoniche sono uniche e sempre sperimentali: archi rampanti, pinnacoli, pennacchi sferici, ecc.
L'approvvigionamento idrico era garantito dai grandi acquedotti romani; l'acqua veniva raccolta in cisterne vicino allo stabilimento termale e, con una complessa reta di distribuzione, mandata alle vasche. Un elemento importante era il forno a legna, situato nella parte centrale del complesso e attiguo alle aree calde. Grazie ad apposite caldaie di bronzo all'interno della muratura, acqua veniva scaldata dal calore del forno e mantenuta costante per tutta la giornata. Il riscaldamento degli ambienti avveniva grazie alla circolazione di aria calda (dai 30° ai 60° C) sotto il pavimento e dietro le pareti [8].
Lo stabilimento apriva alle 13.30 e chiudeva alle 19.00, era aperto a tutti, sia uomini che donne, fino al 320 d.C., quando la Chiesa proibì l'accesso alle donne.[8]
I bagni pubblici in Asia Minore e in Nord Africa sono rimasti attivi anche dopo l'arrivo degli Arabi e dopo il V secolo, quando in Europa caddero in disuso. Qui l'hammam ricopre un ruolo di servizio pubblico tra i più importanti fino al XIX secolo, quando i bagni vennero introdotti nelle abitazioni private.
La più grande differenza dell'hammam arabo dalle terme romane è la scomparsa della grande vasca d'acqua fredda del frigidarium, sia a causa della scarsità dell'acqua sia perché immergersi totalmente era considerato inappropriato in termini religiosi. La localizzazione della struttura è strettamente dipendente dalla prossimità con la moschea e il suq; è solitamente ben integrato con il tessuto urbano, presenta un'entrata discreta, lungo una via secondaria mentre

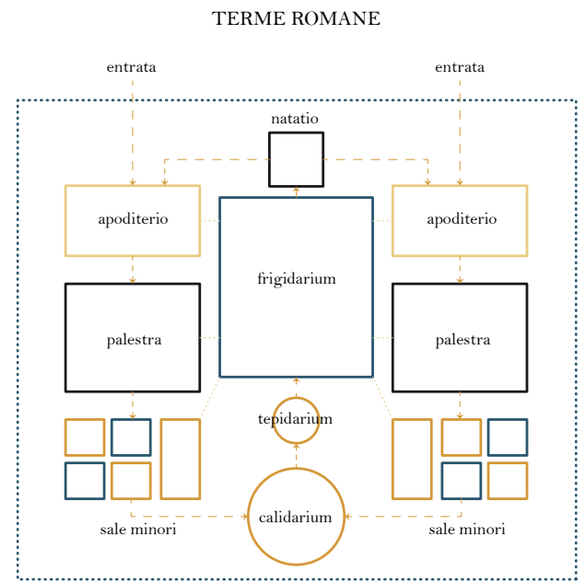


Figura 5 Schemi del percorso delle terme romane e dell'Asia Minore. Produzione propria.

le facciate sono blindate.[10]
I bagni pubblici islamici sono di dimensioni più contenute delle terme romane ma presentano una sequenza di stanze che riprende quella originaria. Gli spogliatoi hanno l'accesso non diretto per salvaguardare la privacy, da qui si passa ai bagni, successivamente alla sala *al-barrani*[10], una piccola sala non riscaldata, e alla *al-wastani*, corrispondente al tepidarium romano ma con le dimensioni maggiori e in cui c'è la piscina. La sala più calda è *al-dakhli*, si trova vicino al forno e ha un piccolo bacino d'acqua calda. Il sistema di riscaldamento è simile a quello adottato dai romani con doppie pareti e doppio pavimento. L'aria calda poi fuoriesce da camini disposti ai quattro lati della stanza calda.
In generale l'impianto dei bagni pubblici in asia minore tende alla linearità e all'ortogonalità, lasciando gli elementi curvi solo per la manipolazione degli spazi o per le nicchie all'interno della muratura. La palestra è vista come un elemento a sé stante; fa parte del complesso senza essere mai assorbita completamente. Le planimetrie risultano ordinate, caratterizzate da una forte gerarchizzazione spaziale e dalla rigorosa disciplina delle relazioni tra le parti.

Uno dei maggiori problemi legati all'hammam è l'elevato consumo di legna da ardere, oltre al fumo che infastidisce le abitazioni circostanti. Una stima del 2007 dice che una caldaia a biomassa all'interno di un hammam arabo consuma circa 430.000 t/anno [10], ciò dimostra quanto sia determinante riuscire ad aumentare significativamente le prestazioni delle caldaie per poter ridurre i consumi. La massa termica dell'edificio è un elemento di notevole rilevanza in quanto determina quanto la massa muraria è in grado di trattenere il calore al suo interno.

Recarsi al bagno pubblico è un rito intriso di significato religioso di purificazione e avvicinamento a Dio. Durante cerimonie come i matrimoni è tipico il rito del "bagno della sposa", oppure per celebrare una nascita o il rito della circoncisione. L'hammam possiede un valore sociale in quanto spazio d'associazione e d'incontro sia per ricchi che per poveri e per questo fa parte del patrimonio locale non tangibile.[10] Le pratiche e i trattamenti a base di oli profumati, fanghi, impacchi naturali, unguenti e sali minerali, oltre ai bagni di vapore e ai massaggi, apportano reali benefici alla salute, combattono lo stress ed aiutano l'eliminazione delle tossine.

Oggi i nuovi hammam tendono a seguire l'organizzazione spaziale originaria ma perdono di efficienza energetica. I complessi antichi sono carenti di manutenzione e spesso presentano situazioni di degrado in copertura. Attualmente i complessi dei bagni pubblici stanno scomparendo; gli unici rimasti sono all'interno delle mura cittadine, vicine alle zone turistiche. Tale situazione di declino è dovuta al fatto che questa tipologia non è riconosciuta come patrimonio storico e dunque non beneficia delle sovvenzioni pubbliche.[10]

La funzione dei bagni pubblici possiede un grande potenziale, sia umano che ambientale. Come scrivono Weber e Yannas in *Lessons from Vernacular Architecture* in future bisognerebbe aprire nuovamente le porte alle donne e ai bambini, oltre che integrare locali per l'educazione e la salute.

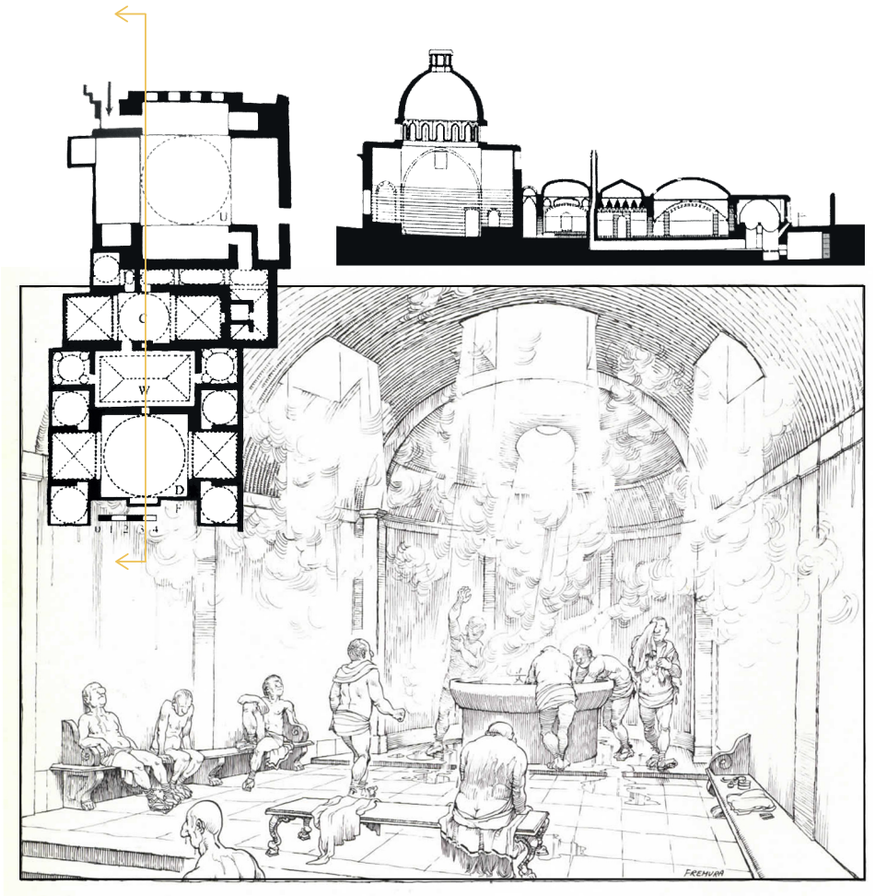


Figura 6 Pianta e sezione del Hammam Ammuneh, fonte W. Weber, *Lessons from Vernacular Architeture*, 2014 pag. 87.88; disegno di Fremura in R. A. Staccioli, *Le Terme di Roma antica*, 1995

8.4 Descrizione di progetto

Un *hammam* non è solo uno spazio di benessere, in cui ci si prende cura di se stessi e della propria salute, ma anche uno spazio sociale di aggregazione. È uno spazio pubblico in cui si sviluppano le dinamiche sociali tipiche della piazza ma con l'aggiunta di un carattere di intimità e riservatezza che ne aumenta il prestigio. Questo è uno dei punti chiave per permettere la buona progettazione degli spazi: la successione dei locali segue il progressivo adattarsi del corpo agli ambienti, ne rispetta i tempi e permette all'ospite di trovarsi il suo spazio personale ottimale. Rispettare i ritmi fisici non solo agevola la sensazione di benessere ma permette all'edificio stesso di mantenere passivamente e naturalmente gli indici climatici stabiliti per ogni sala.
L'idea progettuale concepisce l'intero complesso come un labirinto composto da due percorsi, quello maschile e quello femminile, che si intrecciano, camminano affiancati o sovrapposti, ma che non si incontrano mai. Questa vuole essere una metafora della vita dell'uomo e della donna, vista con un accezione egualitaria ed equilibrata di scambio e condivisione.
Il complesso presenta due accessi; uno dall'interno del tessuto storico e l'altro facilmente raggiungibile dall'arteria stradale principale. Contrariamente a quello che si può pensare, l'accesso degli ospiti è unico, si trova all'interno del tessuto storico ed affaccia su una delle tante vie tortuose e strette della Yazd antica. Ciò conferisce maggior intimità e immediata accoglienza agli ospiti sia maschili che femminili. La capienza massima del hammam è di 150 ospiti che potranno beneficiare del percorso benessere e del giardino. Se l'ingresso è aperto per uomini e donne durante tutta la settimana, l'accesso al giardino sarà regolato giornalmente, alternando l'ingresso alle donne e agli uomini. Dall'entrata si passa direttamente alla zona degli spogliatoi per poi iniziare il viaggio verso la riscoperta del benessere. I due percorsi presentano i medesimi ambienti disposti in sequenza leggermente diversa, per consentire una migliore fluidità degli spazi. Il percorso è stato studiato per essere accessibile a tutti, preferendo rampe e solai lievemente inclinati alle scale. Le sale principali rispecchiano il tradizionale assetto dei complessi termali: tepidarium, calidarium e frigidarium. Non mancano sale relax, patii verdi e portici. Di seguito sono riportati i dati climatici delle sale, riassunti in temperatura e umidità relativa per aria e acqua.(Fig.7)
L'accesso sul lato stradale è invece quello per il personale. Da qui si pió accedere alla sala riunioni, agli uffici, al magazzino e agli spogliatoi per il per-

Abaco locali	**Aria**	**Acqua**
Esterno estate	34°C, 10% HR	-
Esterno inverno	5°C, 50% HR	-
Ingresso/reception	30°C, 40% HR	-
spogliatoi	32°C, 50% HR	-
calidarium	35°C, 70% HR,	33-36°C
sala cascata uomo	40-35°C, 70% HR	36°C
sala cascata donna	28-30°C, 70% HR	32°C
corridoio ventilato	-	-
tisaneria	30 °C, 50% HR	-
patio interno	32°C, 60% HR	-
cromoterapia donna	40°C, 70% HR	33°C
cromoterapia uomo	26°C, 70% HR	20°C
nicchie sensoriali	-	-
tepidarium	28-30°C, 80% HR	28°C-30°C
sala verde	-	-
sala umida	34°C, 100% HR	30°C
bagno turco	45°C, 100% HR	-
frigidarium	25°C, 80% HR	18°C
sala vapor secco	28°C, 30% HR	-
sale trattamenti	28°C, 60% HR	-

Figura 7 Abaco dei locali e delle condizioni climatiche dell'ambiente e delle piscine. Produzione propria.

sonale, che ha accesso all'hammam. Il giardino è accessibile alternatamente a uomini e donne ed offre la possibilità di immergersi nella natura e godere di opere d'artisti contemporanei da tutto il mondo che usano il vento come ingrediente per le loro opere.

8.5 Strategie bioclimatiche

8.5.1 Il patio

Il patio contiene diversi elementi indispensabili per il comfort come la vegetazione per ombreggiare gli ambienti interni, le vasche d'acqua che aiutano a umidificare l'aria e alti muri per direzionare la ventilazione.[1]
Il fenomeno che viene sfruttato è quello del **raffrescamento evaporativo** che usa parte dell'energia sensibile dell'aria per far cambiare di stato le particelle d'acqua. Cedendo energia l'aria abbassa la sua temperatura. L'efficacia del raffrescamento evaporativo è molto alta se sono garantite alcune condizioni essenziali quali la presenza di un ambiente secco e un'adeguata esposizione dell'aqua alla ventilazione.
Per far evaporare 1 g d'acqua sono necessari 2424 J, che, applicati a 1 m^3 di aria, abbassano la temperatura di 2,2°C.

Logge e porticati presentano condizioni climatiche sempre intermedie tra l'ambiente interno e quello esterno. Per questo, tutti gli spazi di transizione tra stanze che presentano condizioni climatiche differenti sono molto importanti: esse aiutano il corpo a autoregolarsi naturalmente e in maniera graduale, agli sbalzi di temperatura, almpliando la zona di comfort.
Un altro dei benefici della vegetazione, oltre a produrre ombreggiamento, è che umidifica l'aria immettendo il vapore acqueo prodotto dall'evapotraspirazione. Essa innalza l'umidità relativa anche del 20%, soprattutto nelle ore serali.[2]
L'azione congiunta di acqua, vegetazione e ventilazione genera un vero e proprio microclima all'interno del patio.

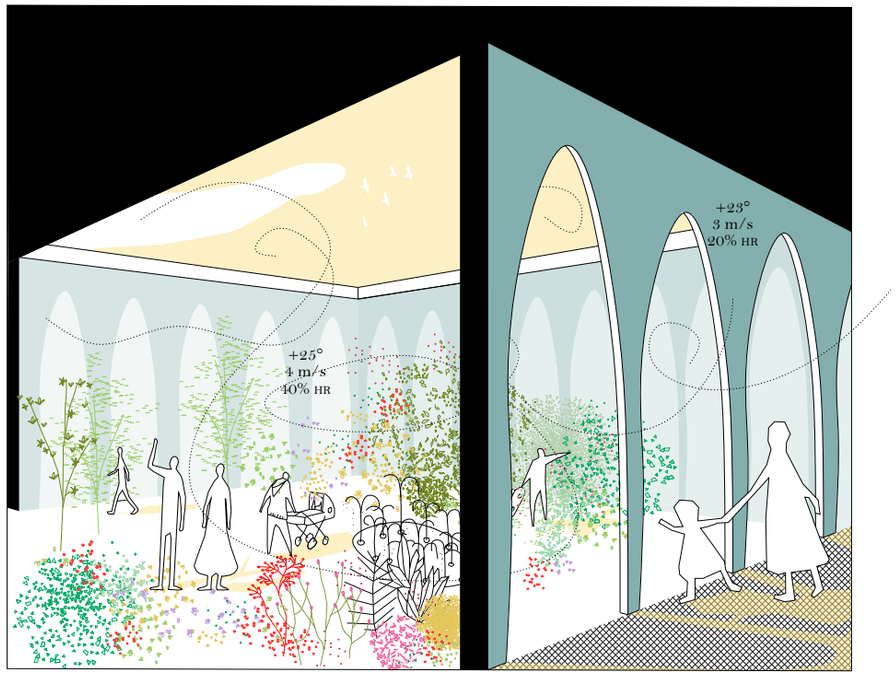
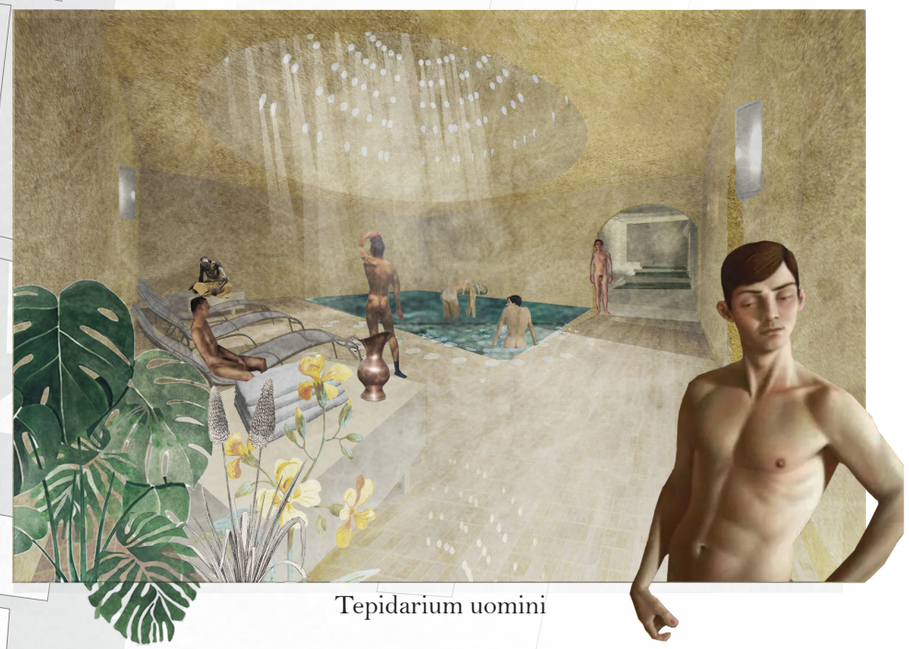


Figura 8 Il patio che respira. Produzione propria.

Legenda

- donne
- uomini
- spazi misti

1 Entrata
2 Ufficio
3 Spogliatoio
4 Tepidarium
5 Corridoio ventilato
6 Sala delle cascate
7 Cromoterapia
8 Nicchie sensoriali
9 Calidarium
10 Patio
11 Sala verde
12 Tisaneria
13 Bagno turco
14 Sala umida
15 Locale tecnico
16 Frigiarium
17 Bagno di vapore secco
18 Salette trattamenti
19 Giardino
20 Scala a elica
21 Sala del cielo notturno
22 Passerella
23 Area espositiva
24 Totem evaporativi
25 Sala conferenze
26 Sala relax
27 Magazzino
28 Vano carico/scarico merc
29 Spogliatoi personale
30 Cisterna d"acqua
31 Sala filtraggio
32 Sala disinfezione
33 Sala riscaldamento
34 Qanat
35 Sala fredda



Tepidarium uomini

Sala della cromoterpia donne

Figura 9 Pianta piano terra e viste interne. Produzione propria.
Figura 10 (pagina seguente) Sezione prospettica. Produzione propria.

0 1 2 5 10 20 m

8.5.2 Le cupole

Durante tutta la storia dell'architettura iraniana le cupole hanno lasciato un'impronta profonda che si è sviluppata passo dopo passo con diversi livelli di transizione. Le prime cupole, risalenti all'impero Achemenide, hanno gli intradossi semicircolari, semiellittici, appuntiti. Essi prendono la loro forma dalla tradizione delle culture mesopotamiche che, a causa della scarsità di legname, costituivano una valida alternativa come copertura degli edifici. Durante il periodo di Ciro il Grande, i sovrani incontravano il popolo sotto ampie tende a cupola; esse venivano chiamate cieli per attribuire un carattere cosmico ai sovrani. È durante il periodo sassanide che vennero inventati i pennacchi che permettono a sale quadrate di possedere una copertura a cupola. Le prime cupole della persia islamica continuano la forma arrotondata sassanide e la inseriscono come simbolo dei mausolei. Con il tempo la costruzione e la tipologia delle cupole si fece via via più raffinata: esistono vari tipi di cupole a doppio guscio. Oggi l'architettura iraniana ci presenta cupole dagli intradossi splendidamente decorati.

La cupola, al contrario del minareto, non ha una connotazione architettonica esclusiva della moschea né dei servizi pubblici: essa si vede in quasi la totalità degli edifici della città.

Le coperture a cupola sfruttano in principio di **raffrescamento convettivo**. Il calore proveniente dal tetto è limitato grazie alla mite temperatura dell'aria presente nell'intradosso della cupola. Tale soluzione diventa più efficace con il vento. L'apertura all'apice della cupola genera una differenza di pressione che spinge l'aria calda verso l'esterno. Lo sfiato è solitamente coperto da un cappello con dei fori che aiutano a direzionare il vento. Le tipiche coperture iraniane non sono solo a cupola ma anche cilindriche; in questo caso l'asse del cilindro è perpendicolare alla direzione del vento prevalente, dove invece il vento soffia da direzioni non constanti allora la soluzione a cupola è la migliore. Le caratteristiche coperture a cupola sono utili per minimizzare l'accumulo di radiazione solare durante il giorno e massimizzare la dispersione del calore verso l'esterno di notte.

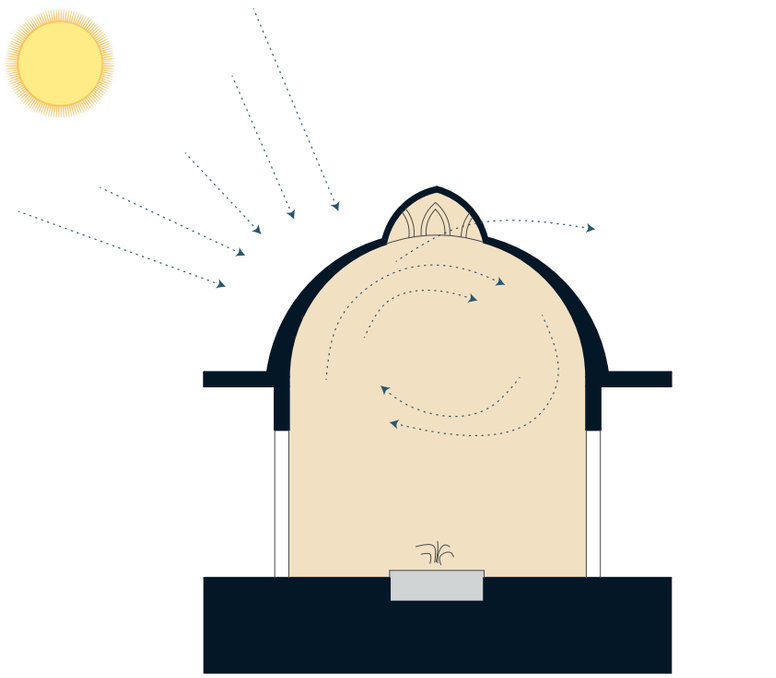
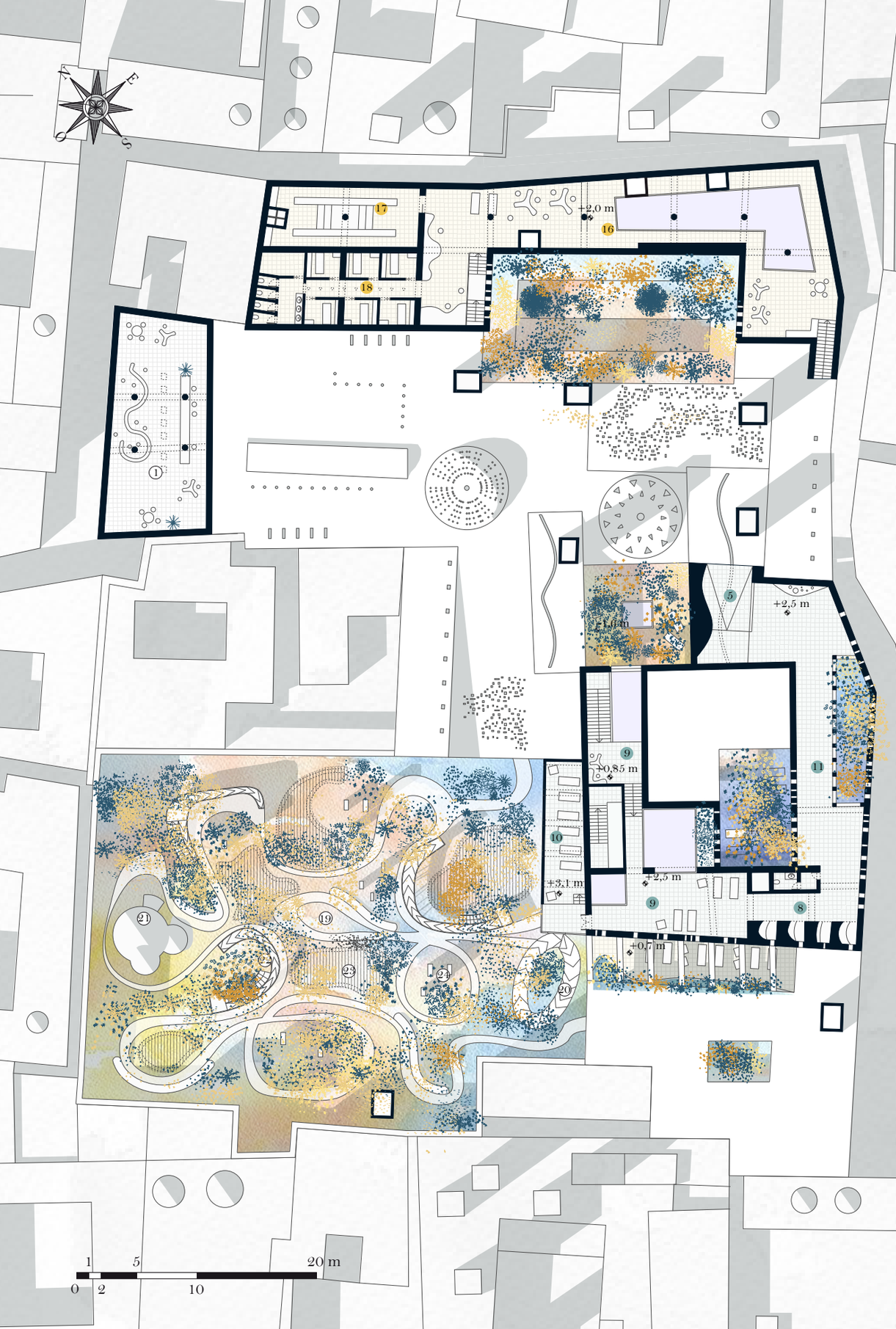


Figura 11 Schemi di ventilazione convettiva . Produzione propria.



Legenda

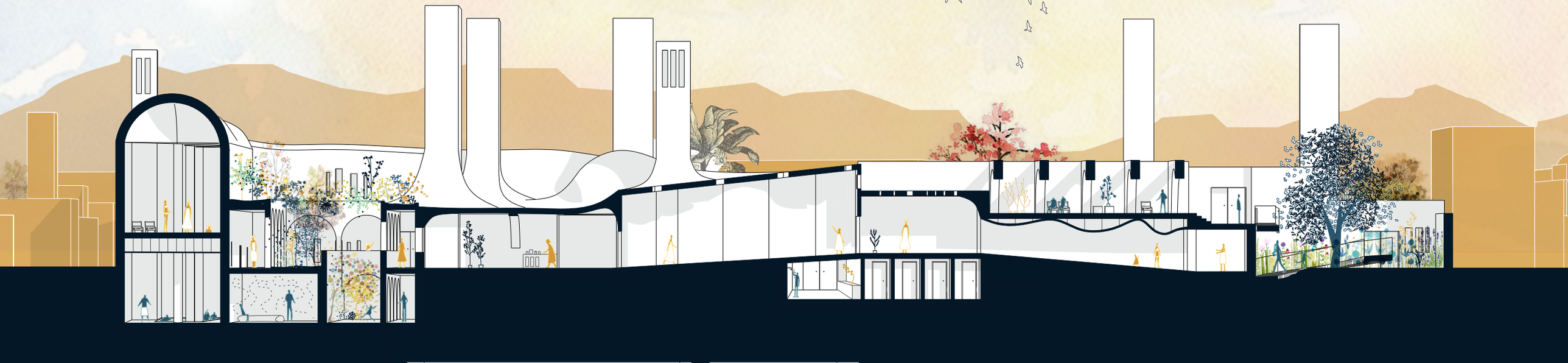
- donne
- uomini
- spazi misti

1 Entrata
5 Corridoio ventilato
8 Nicchie sensoriali
9 Calidarium
10 Patio
11 Sala verde
16 Frigiarium
17 Bagno di vapore secco
18 Salette trattamenti
19 Giardino
20 Scala a elica
21 Sala del cielo notturno
22 Passerella
23 Area espositiva
24 Totem evaporativi

Frigidarium donne

Calidarium uomini

Figura 12 Pianta primo livello e viste interne. Produzione propria.
Figura 13 (pagina seguente) Sezione prospettica. Produzione propria.



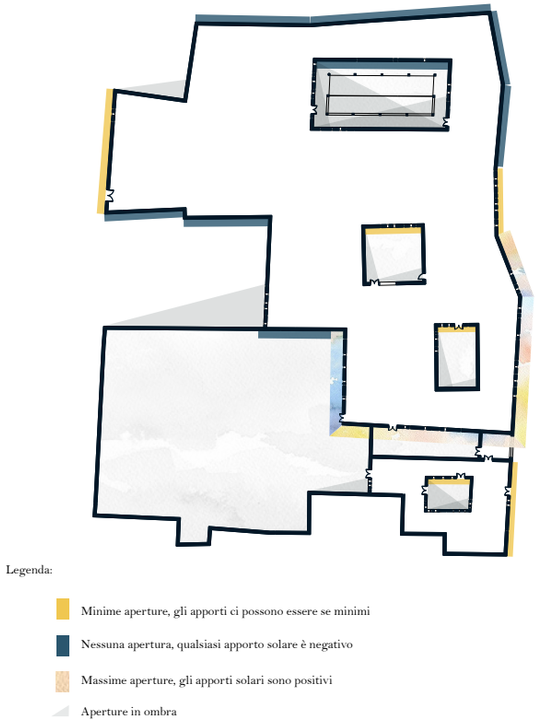
0 1 2 5 10 20 m

8.5.3 Ombreggiamento

Un metodo semplice ed efficace disegnare le facciate e tenere sotto controllo gli apporti solari è quello delle maschere d'ombra (vedi cap.5, paragrafo 5.7.4) applicato alle facciate del complesso. Nei casi in cui risultava necessario schermare le aperture, si è optato per un'analisi degli ambienti, tenendo in considerazione delle condizioni climatiche stabilite per il percorso hammam e che non necessariamente corrispondono con le condizioni di benessere di un ambiente qualsiasi.

Le facciate sono state divise in zone dove:

-Aperture in ombra
-Minime aperture, gli apporti ci possono essere se minimi
-Massime aperture, gli apporti solari sono positivi
-Nessuna apertura, qualsiasi apporto solare è negativo



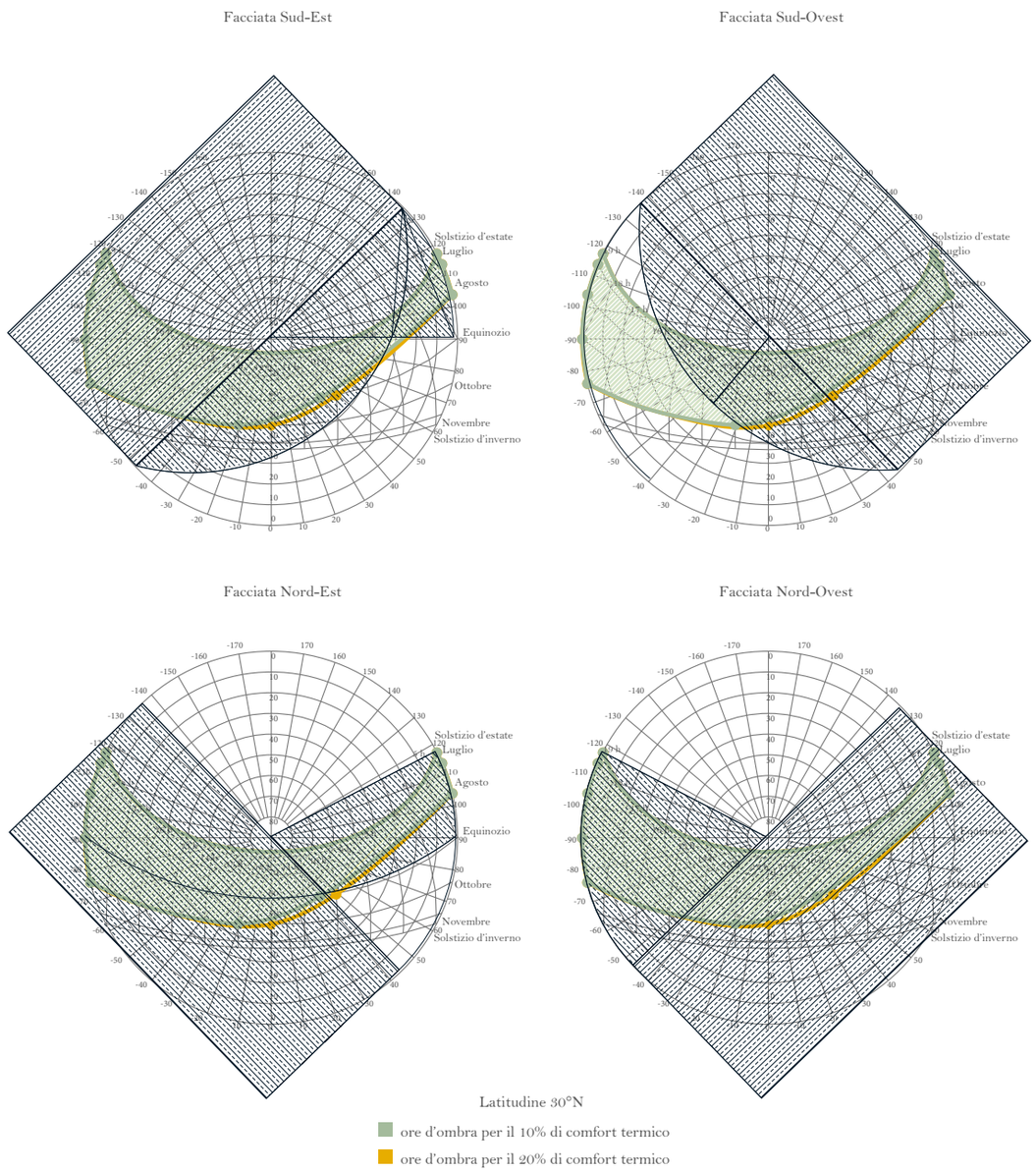
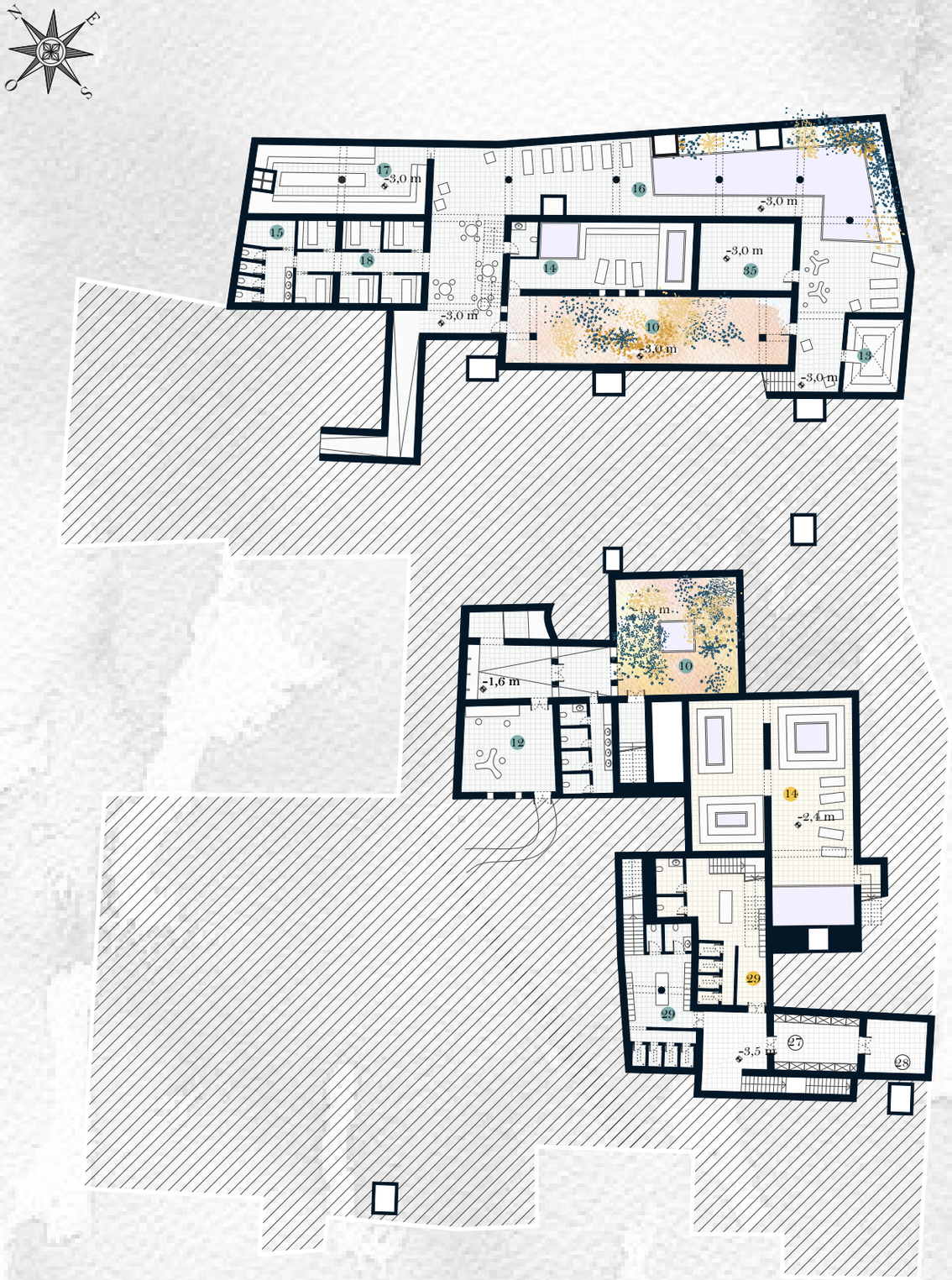


Figura 14 (pagina a fianco) Studio dell'ombreggiamento delle facciate. Produzione propria.
Figura 15 Maschere d'ombra applicate alla facciata dell'edificio. Produzione propria.



Legenda

- donne
- uomini
- spazi misti

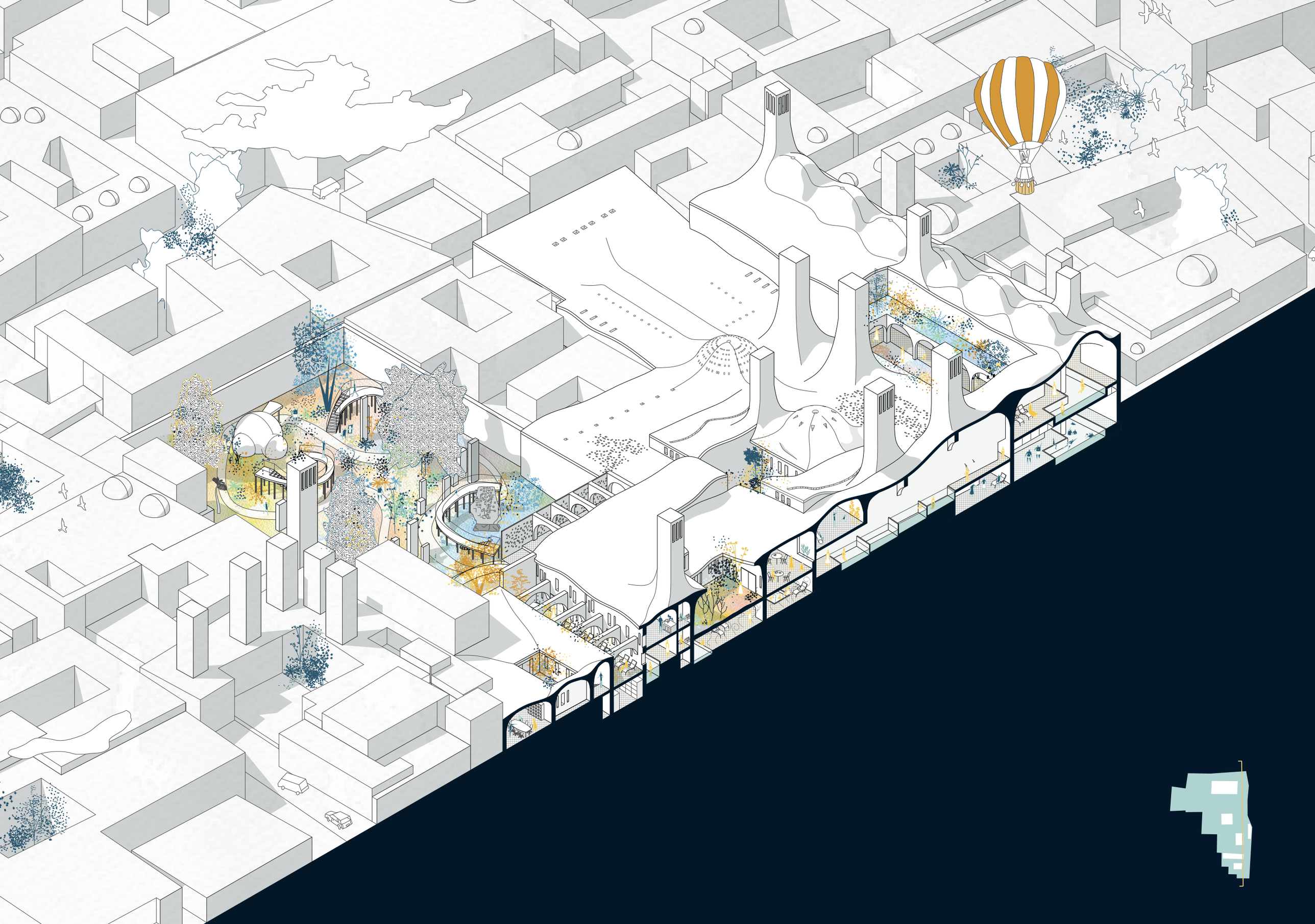
10 Patio
12 Tisaneria
13 Bagno turco
14 Sala umida
15 Locale tecnico
16 Frigiarium
17 Bagno di vapore secco
18 Salette trattamenti
27 Magazzino
28 Vano merci
29 Spogliatoi personale
35 Sala fredda

Patio porticato

Giardino

Figura 16 Pianta livello interrato e viste interne. Produzione propria.
Figura 17 (pagina seguente) Sezione prospettica. Produzione propria.
Figura 18 (pagine seguenti) Spaccato assonometrico. Produzione propria.

0 1 2 5 10 20 m



8.5.4 Il giardino

All'interno del giardino gli ospiti potranno godere di un percorso nella natura, arricchito da *spazi espositivi* per artisti contemporanei che usano il vento come elemento essenziale per le loro opere; *passerelle* per ammirare l'incantevole paesaggio di Yazd e scoprire le fresche brezze che soffiano sui tetti della città; la *sala del chiaro di luna*, fresca e rilassante ed infine le *colonne evaporative*, che rilasciano aromi profumati.

Il percorso espositivo

Il percorso espositivo unisce i più importanti artisti contemporanei che lavorano con arte e vento. Tra questi troviamo sicuramente Janet Echelman, Pinuccio Sciola e Anthony Howe.

Janet Echelman è un'artista americana che crea sculture sperimentali a grande scala, capaci di trasformarsi con il vento e la luce. Le sue sculture sono realizzate con speciali reti da pescatore colorate e molto resistenti. I suoi lavori non sono solo opere da guardare, ma degli ambienti viventi in cui ci si può perdere. Di recente J. Echelman è stata nominata "Architectural Digest Innovator" per aver cambiato l'essenza degli spazi pubblici. [3]

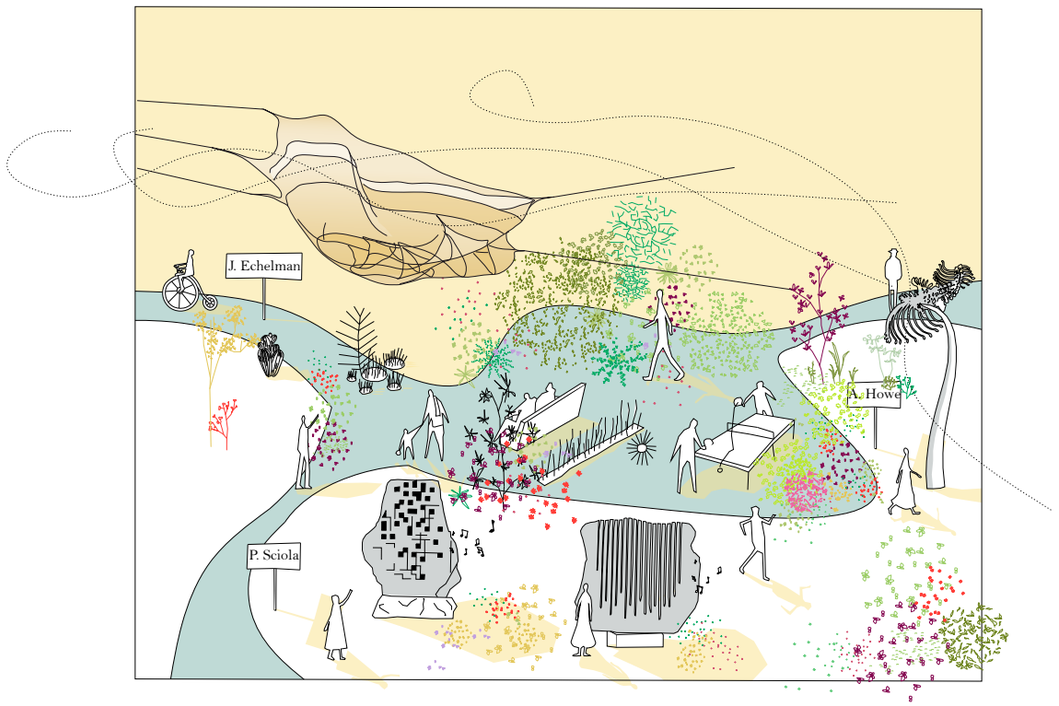
Pinuccio Sciola è uno scultore e musicista sardo famoso per le sue "pietre sonore": grandi menir che risuonano grazie a incisioni parallele sulla roccia. I suoni prodotti ricordano il vetro, il metallo, ma anche il legno e la voce umana. [4]

Lo scultore cinetico **Anthony Howe** crea sculture metalliche guidate dal vento che sembrano pulsare. Le sculture, principalmente in acciaio, ricordano le forme curvilinee della microbiologia o di astronomia. L'eleganza delle linee muta in movimento torbolento nel momento in cui le pale vengono colpite dal vento.[5]

Le passerelle

La velocità del vento aumenta con l'altezza dal suolo. Il profilo delle velocità è un profilo logaritmico che dipende dalla "rugosità" del luogo. La presenza di vegetazione, l'altezza del tessuto urbano o di superfici che ostacolano il flusso d'aria cambiano tale profilo.[6]

Una passerella ad altezze diverse può far percepire le variazioni di velocità e temperatura dovute alla differenza di quota.



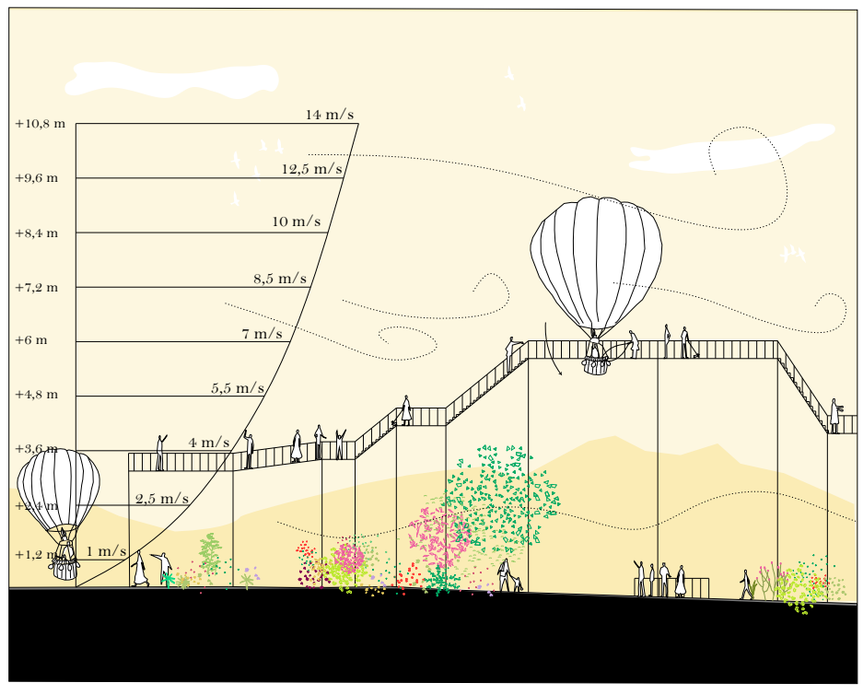


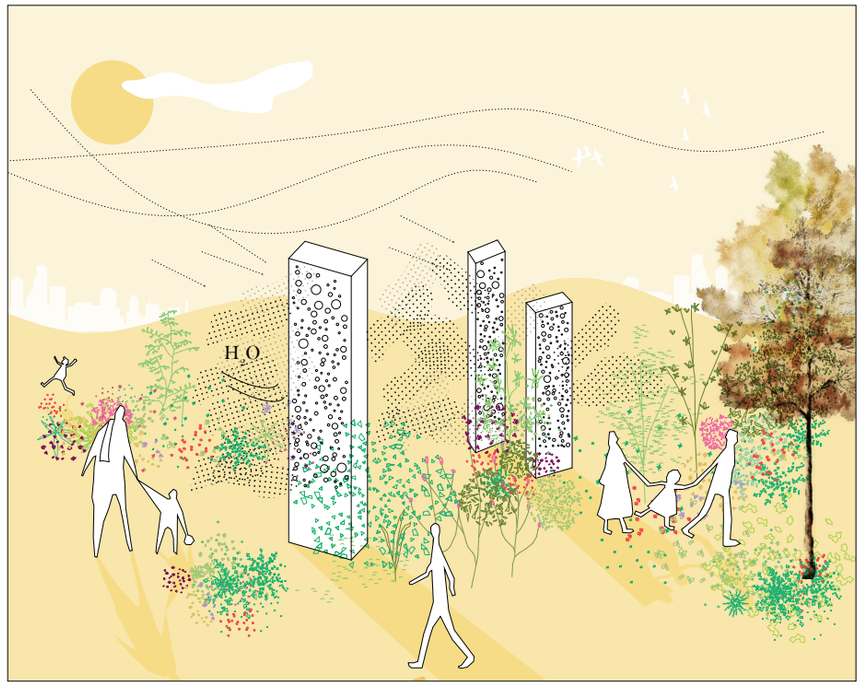
Figura 19 Il percorso espositivo. Produzione propria.
Figura 20 Le passerelle. Produzione propria.

Le torri evaporative

Questi dispositivi, collegati al circuito idrico del complesso, usano l'acqua non più utilizzabile per le piscine per mettere in atto il principio del **raffrescamento evaporativo**. La torre è composta da diversi strati, ognuno con una propria funzione specifica: il cuore della torre è composto da un contenitore forato con l'acqua di recupero; una superficie spugnosa e profumata, l'avvolge, permettendo all'acqua di impregnare tutto lo strato; l'ultimo layer è costituito da una superficie di metallo scuro e forato. Il metallo, a contatto con la radiazione solare, si surriscalda molto facilmente, facendo così evaporare l'acqua al suo interno. L'effetto finale sarà quello di umidificare e profumare con aromi esotici o rilassanti la zona circostante.

La sala del cielo notturno

I corpi si riscaldano non solo per la temperatura dell'aria ma anche per l'assorbimento diretto delle radiazioni elettromagnetiche del sole che, quando entrano in contatto con una superficie solida, si trasformano in calore. La sala del cielo notturno sfrutta il principio del **raffrescamento radiante**, simulando l'effetto del cielo notturno. Le pareti della sala schermano tutte le radiazioni solari e perciò impedisce che i corpi al di sotto di esso non si surriscaldino. La forma a luna crescente dei fori in copertura permettono il passaggio di stretti fasci di luce che, non solo conferiscono un'atmosfera magica alla sala, ma la cui area è calcolata per immettere nell'ambiente la stessa quantità di luce della luna durante una notte di luna piena (circa 0,1-0,5 lux). L'intradosso delle cupole sono dipinte di colore scuro per assorbire l'intero spettro della luce visibile, come durante la notte. La sala è inoltre collegata a un condotto di areazione sotterraneo, collegato a una torre del vento di piccole dimensioni che cattura l'aria fresca del giardino. Durante il percorso sotterraneo l'aria si raffredda ulteriormente tramite il contatto con la massa termica della terra.



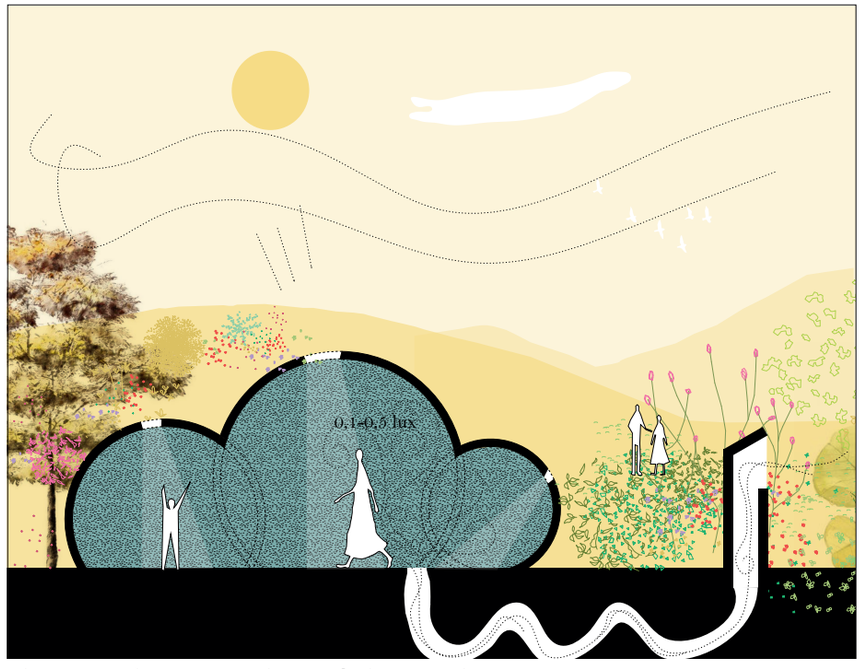


Figura 21 Colonne evaporative. Produzione propria.
Figura 22 Sala del chiaro di luna. Produzione propria.

8.6 La ventilazione

Nel progetto del hammam le linee sinuose della copertura consentono alle brezze di planare ed accarezzare la superficie senza generare aree di turbolenza; le cupole accelerano i moti convettivi dell'aria e favoriscono la fuoriuscita dell'aria più calda e viziata.
Ogni torre del vento ha una specifica funzione: le due torri collegate alle sale umide presentano sistemi di umidificazione dell'aria che non sono altro che superfici porose imbevute d'acqua e posizionate all'interno della sezione della torre.
La torre della sala secca ha sezione a condotto multiplo poiché svolge la funzione di immissione ed estrazione del flusso.
Le cinque torri collegate alla cisterna d'acqua sotterranea prediligono direzioni opposte per garantire una continua entrata ed uscita dell'aria. Tuttavia per immettere una maggior quantità di flusso due delle cinque torri hanno la bocca rivolta verso la direzione prevalente del vento mentre le altre tre si rivolgono verso le direzioni restanti.
Nel tepidarium l'ambiente viene mantenuto mite grazie all'aria proveniente da un condotto sotterraneo, catturata precedentemente sia da una torre del vento situata nel giardino che quella tra il complesso e i locali del personale.
Nei corridoi del vento la sensazione della brezza viene accentuata dalla forma sinuosa delle pareti che genera spazi di ampiezza variabile e che quindi modificano sensibilmente la velocità della brezza che l'attraversa. Inoltre entrambi i corridoi sono dotati di aperture sulle pareti opposte che generano un flusso incrociato.
Ogni spazio del complesso hammam dispone di sistemi di ventilazione naturale che garantiscono il mantenimento delle condizioni climatiche di progetto eliminando qualsiasi sistema elettrico di refrigeramento dell'aria.

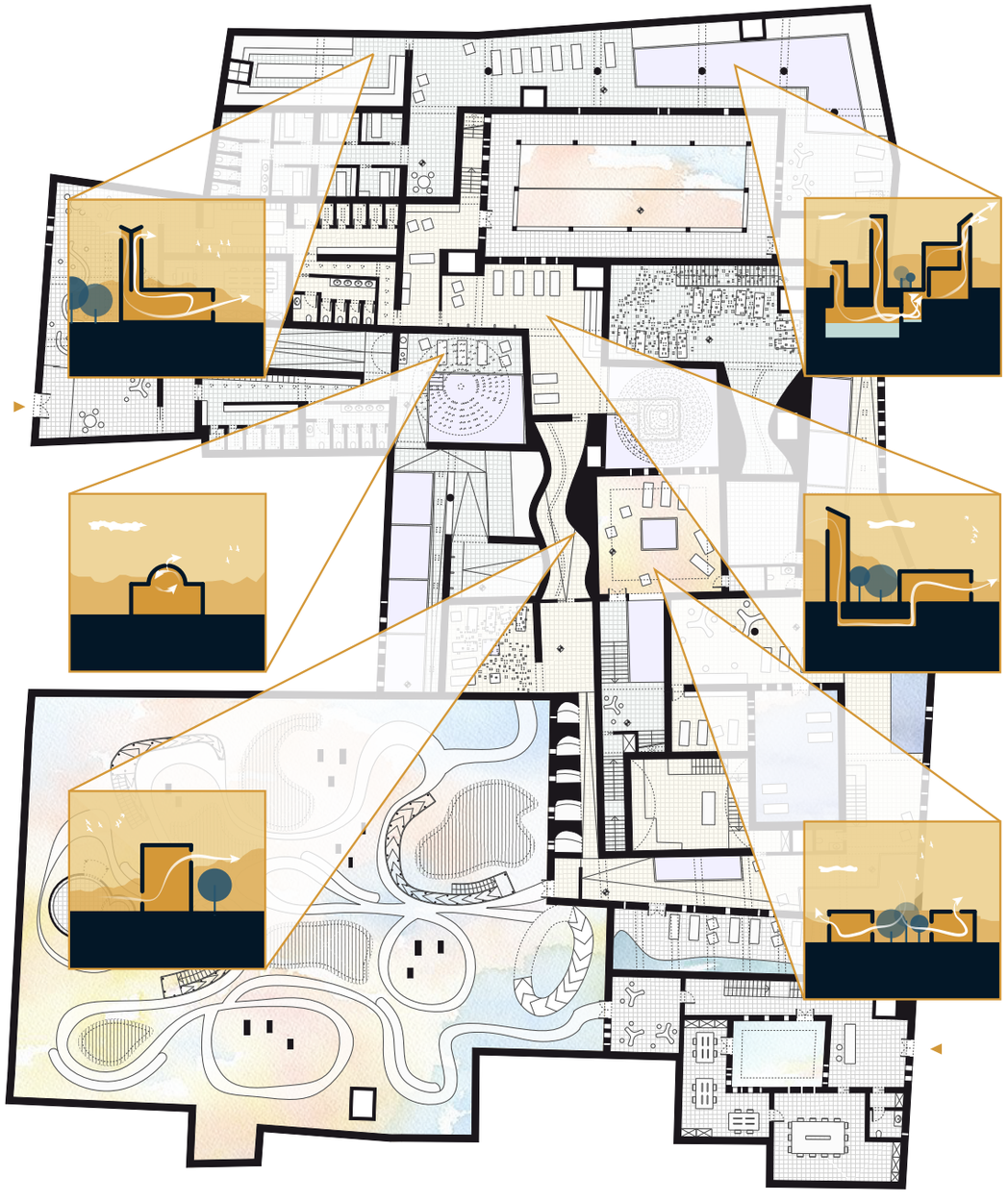
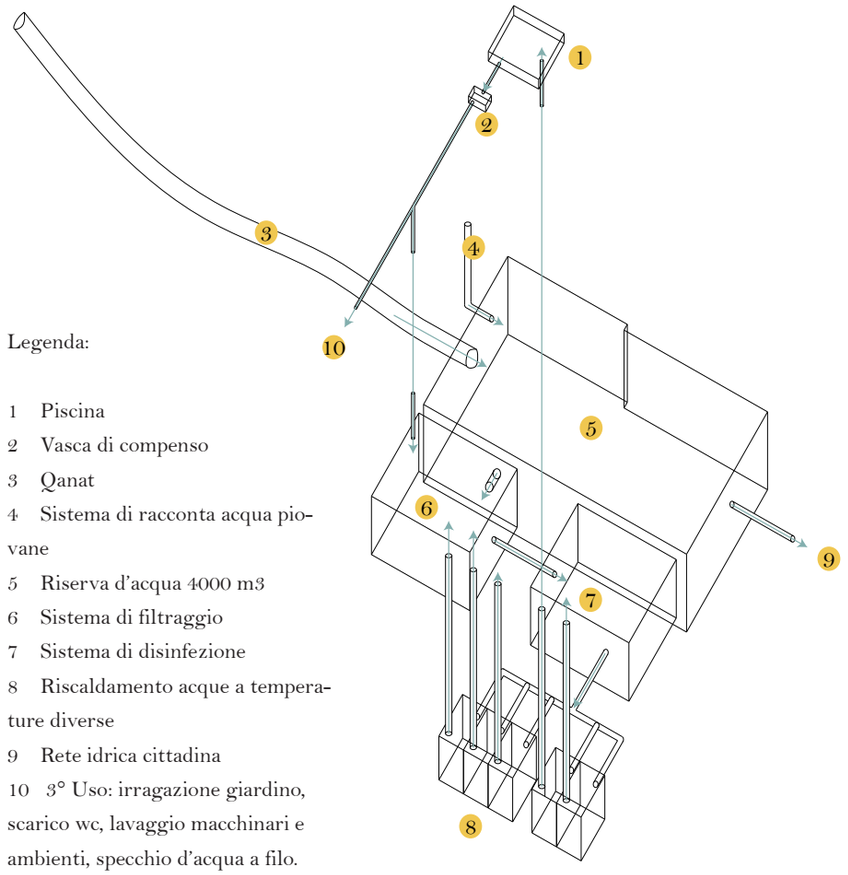


Figura 23 Schema dei sistemi ventilativi, Produzione propria.

8.7 Il ciclo dell'acqua

Il ciclo dell'acqua parte dall'antichissima rete di canali sotterranei (3) che per migliaia di anni ha portato l'acqua dai ghiacciai dell'altopiano iraniano sino alla città, percorrendo chilometri nel deserto. È previsto anche un sistema di raccolta delle acque piovane (4) che, dalla vasta copertura del complesso, passa ai patii e successivamente nella cisterna. L'acqua viene convogliata all'interno di una cisterna sotterranea di circa 4000 m3 (5) dove è conservata prima di farla passare nelle tappe necessarie a renderla balneabile. Il sistema di filtraggio (6) adottato è quello con **filtri a più strati** che, grazie all'assenza di additivi chimici, permette il totale riutilizzo dell'acqua per l'irrigazione del giardino e dei patii verdi. Per l'impianto di disinfezione (7) si è optato per la tipologia a **sodio ipoclorito** poiché garantisce ottime prestazioni igienico-sanitarie. L'acqua filtrata e disinfettata passa al blocco di riscaldamento (8) e quindi immessa nelle piscine (1).
All'interno di una piscina, l'acqua non è mai stagnante ma in continua circolazione, periodicamente prelevata, purificata, filtrata e ri-immessa nella vasca. Una volta che la piscina è riempita l'acqua non viene rinnovata totalmente ma solo in parte. Tramite gli sfioratori, l'acqua può essere ri-immessa in circolo. La vasca di compenso (2), di dimensioni dal 5 al 10% del volume della piscina, raccoglie l'acqua dai canali di sfioro, compensa le modifiche di volume dovute alla presenza dei bagnanti e reintegra l'acqua evaporata o portata via dai bagnanti stessi. Terminato il ciclo ammissibile di depurazione dell'acqua, essa inizia il suo cosiddetto **3° uso**, ossia viene utilizzata come acqua di sacrificio per innescare il processo di raffrescamento evaporativo sia nelle torri del vento (vedi paragrafo Ventilazione) che nelle colonne evaporative del giardino; ma anche per la pulizia dei locali e dei macchinari e come ultimo step come acqua di scarico per i servizi igienici.

Nel caso in cui il flusso d'acqua dal qanat fosse in esubero o mancasse, la cisterna è collegata sia in mandata che in ritorno alla rete idrica e fognaria della città di Yazd (9).



Legenda:

1 Piscina
2 Vasca di compenso
3 Qanat
4 Sistema di racconta acqua piovane
5 Riserva d'acqua 4000 m3
6 Sistema di filtraggio
7 Sistema di disinfezione
8 Riscaldamento acque a temperature diverse
9 Rete idrica cittadina
10 3° Uso: irragazione giardino, scarico wc, lavaggio macchinari e ambienti, specchio d'acqua a filo.

Figura 24 Schema del ciclo dell'acqua. Produzione propria.

8.8 Frigidarium: verifiche di fluidodinamica

Il caso preso in esame tratta di una parte del complesso dell'hammam che va dalla cisterna sotterranea agli ambienti del frigidarium. All'interno di questi ambienti si vuole garantire una temperatura di 25°C e considerando che l'aria esterna si trova a una temperatura di 34°C e umidità relativa 10% [7]. Seguendo il riferimento dell'architettura tradizionale iraniana il sistema sfrutta torri del vento e il raffrescamento evaporativo, utilizzando l'acqua proveniente dal sistema sotterraneo di qanat. Il sito presenta una ventosità media continua e moderatamente intensa (16 km/h) che può essere sfruttata per attivare flussi di ventilazione completamente naturali.

La forma architettonica che traduce queste esigenze è la seguente: una cisterna sotterranea posta 8 m sotto livello del suolo di dimensione 427 m^2 comunicante con l'ambiente esterno per mezzo di cinque torri. Due di queste presentano aperture rivolte verso la direzione prevalente del vento, altre due verso la direzione opposta, agendo come torri di estrazione dell'aria, e l'ultima nelle direzioni laterali, per catturare le brezze provenienti dalle direzioni di minor frequenza. In totale la cisterna ha un'altezza di 6 m, di cui si prevede la metà sarà occupata dall'acqua proveniente dalla rete qanat e dalle coperture. All'interno della cisterna avviene il raffrescamento evaporativo.
L'aria è in grado di assorbire una certa quantità di vapore acqueo in funzione della sua temperatura. Il sito è caratterizzato da basse umidità relative estive e presenta quindi un ottimo potenziale di raffrescamento evaporativo. Il raffrescamento evaporativo produce due effetti: la diminuzione della temperatura dell'aria e, in parte, dell'acqua, e l'aumento dell'umidità relativa dell'aria. Infatti durante il processo di evaporazione superficiale il passaggio di stato dell'acqua a contatto con l'aria assorbe necessariamente una quota di calore (calore latente di vaporizzazione), che è principalmente sottratto dal fluido più caldo tra i due. Il processo quindi determina una riduzione della temperatura dell'aria e l'aumento dell'umidità relativa della stessa. Questa variazione di temperatura non modifica l'entalpia dell'aria poiché la diminuzione di calore è compensata dall'aumento dell'umidità. Per questo motivo questo tipo di raffrescamento si può dire adiabatico.
Tanto più l'aria iniziale è secca tanto più intenso può essere il raffrescamento sensibile.
Il tasso evaporativo è stato calcolato utilizzando la seguente correlazione empirica definita da Mohammed Shas[8](ASHRAE 2014) per gli specchi d'acqua indisturbati.

$$E_0 = b(pw-pr)$$

In cui:
b coefficiente sperimentale pari a 0,00005 [kg/h/m^2/Pa]
pw pressione di saturazione alla temperatura dell'acqua pari a 2336,6 Pa
pr pressione parziale del vapore nell'aria alle condizioni ambiente, pari a 562,16 Pa

Da qui si ricava un valore della potenza termica evaporativa pari a 26,31 kW, così definita:

$$P_{evap} = E_0 * \Delta h_{evap}$$

Dove:
Δh_{evap} è l'entalpia di vaporizzazione, cha vale 2500 J/g
Considerando che tale potenza viene estratta totalmente dall'aria e considerando le condizioni dell'aria di progetto all'interno dell'edificio, si è calcolata la portata d'aria massima teorica che il sistema è in grado di raffreddare nelle condizioni di riferimento, secondo la formula:

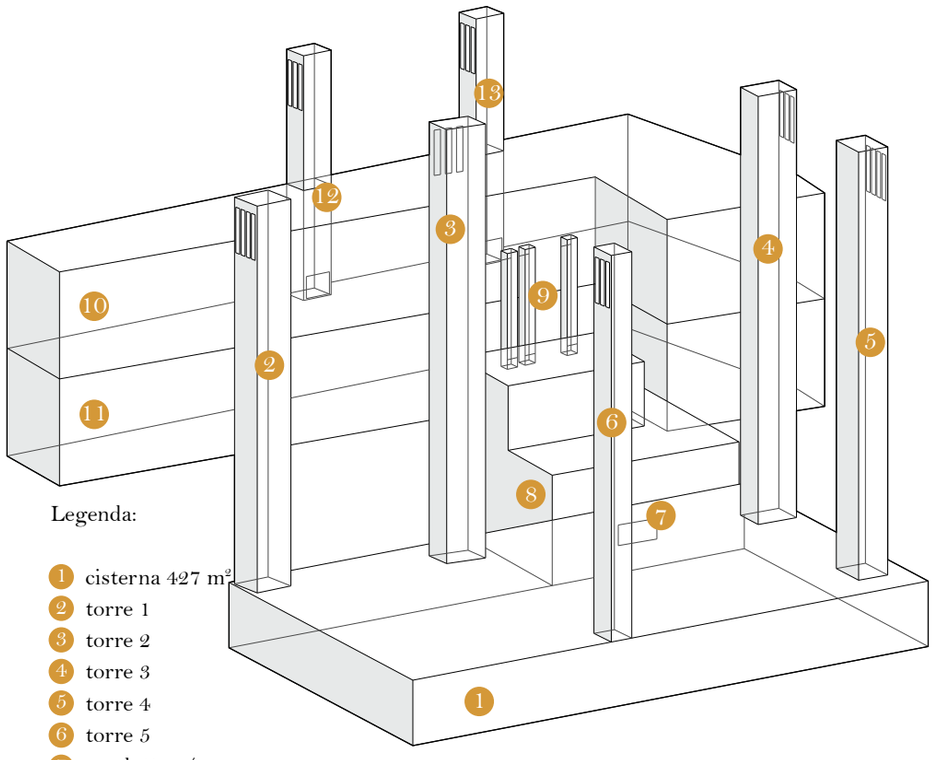
$$ma = P_{evap}/cp*(T_{est}-T_{fri})$$

Dove:
ma= portata d'aria [kg/s]
Cp= calore specifico dell'aria [J/kg/K]
T_{est}=34°C
T_{fri}= 25°C

La portata d'aria massima teorica così ottenuta è di 8000 m^3/h. Considerando che lo scambio termico avviene solo in prossimità della superficie dell'acqua e che parte del calore in realtà viene estratto dall'acqua, e che la ventosità presenta, seppur limitate, variazioni di intensità, la verifica di progetto viene realizzata considerando cautelativamente una portata corrispondente a circa il 50% di quella massima teorica calcolata.
La verifica progettuale è stata effettuata con tecniche di simulazione fluidodinamica computazionale (CFD) per mezzo del nuovo software CFD VENTO AEC. La simulazione ha considerato una rappresentazione 3D semplificata in

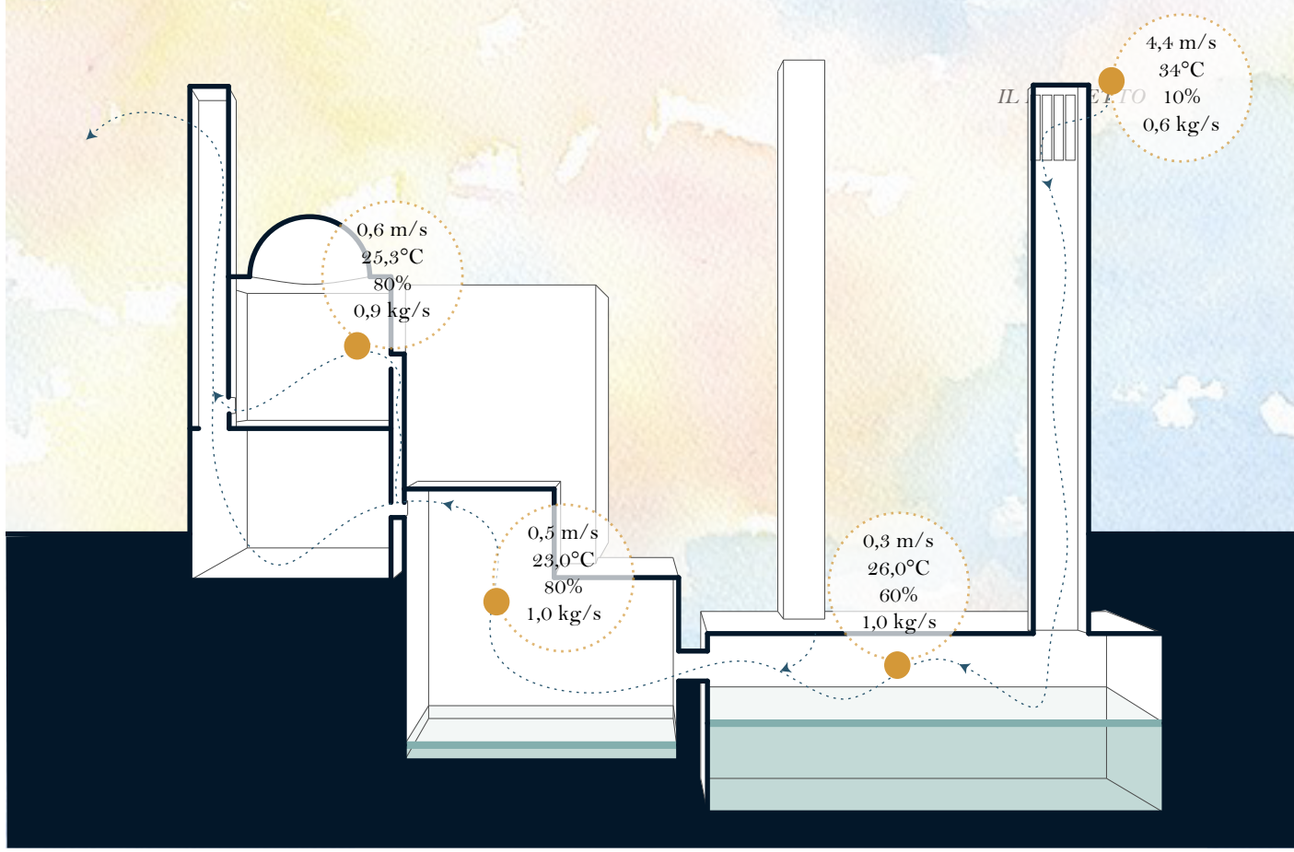
scala reale dell'edificio. Il modello è stato impostato con i seguenti parametri:

Velocità del vento= 4,4 m/s (ad un'altezza di 10 m dal suolo)
Potenza termica evaporativa=26 kW
Temperatura dell'acqua della cisterna=20°C
La potenza evaporativa è stata inserita come un termine negativo di sorgente di calore in un volume d'aria prossimo al pelo dell'acqua.
Inoltre è stato utilizzato il setup Outdoor che include automaticamente nel modello lo strato limite atmosferico in ambito urbano.
Di seguito sono riportati i risultati dell'analisi.



Legenda:

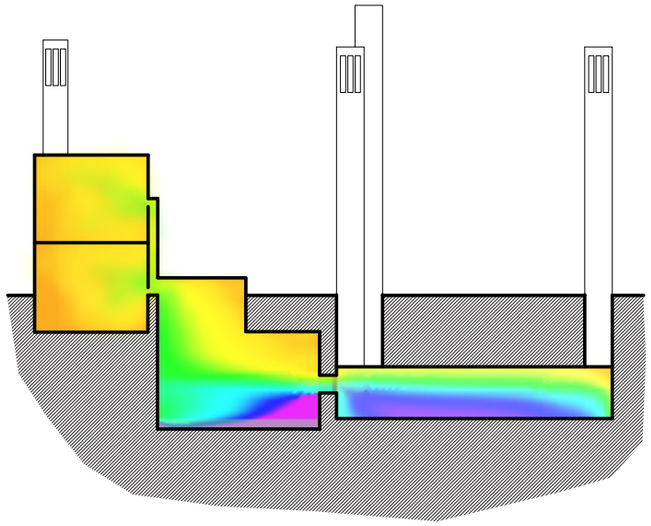
1. cisterna 427 m²
2. torre 1
3. torre 2
4. torre 3
5. torre 4
6. torre 5
7. condotto c/s
8. sala fredda 85,9 m²
9. condotti s/f
10. frigidarium donne 186,2 m²
11. frigidarium uomini 186,2 m²
12. torre estrattiva 1
13. torre estrattiva 2

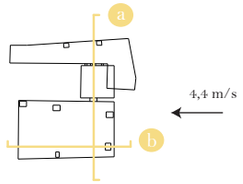


	Portata media [kg/s]	Portata media [m³/h]	Temperatura media [°C]
Torre 1	+0,41	+1'216	34,1
Torre 2	-	-	-
Torre 3	-	-	-
Torre 4	-	-	-
Torre 5	+0,60	+1'761	34,1
Torre estrattiva 1	-0,09	-256	32,3
Torre estrattiva 2	-0,03	-93	32,2
Condotto c/s	1,02	2'992	23,3
Condotto s/f 1	0,28	832	25,3
Condotto s/f 2	0,27	779	25,2
Condotto s/f 3	0,27	795	25,4
Condotto s/f 4	0,26	773	25,3
Cisterna	0,34	1'011	26,0
ma	1,01	2'978	

Figura 25 Schema del ciclo dell'aria dalla cisterna al frigidarium. Produzione propria.
Figura 26 Sezione prospettica degli ambienti del ciclo dell'aria. Produzione propria.
Figura 27 Tabella delle portate e delle temperature. Produzione propria.

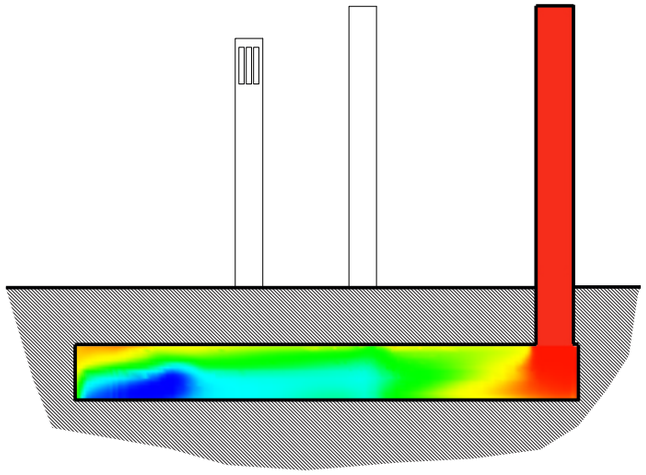
a



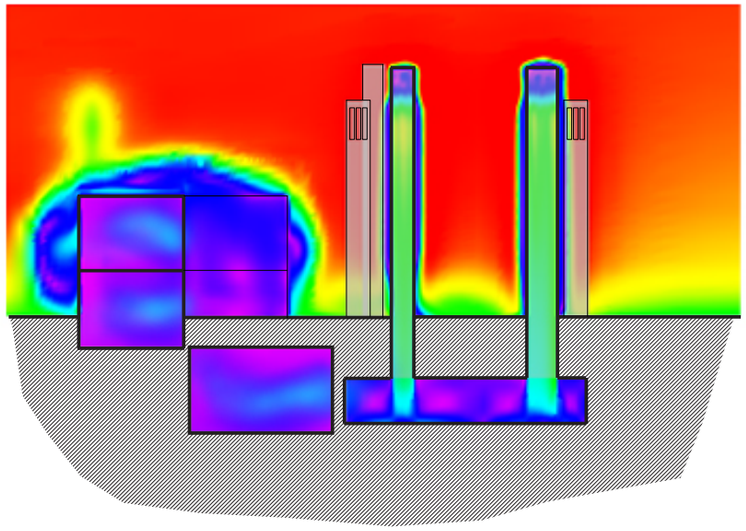


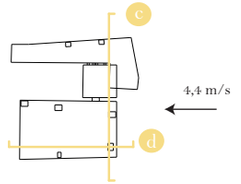
Temperatura media [°C]

b



c





Velocità media [m/s]

d

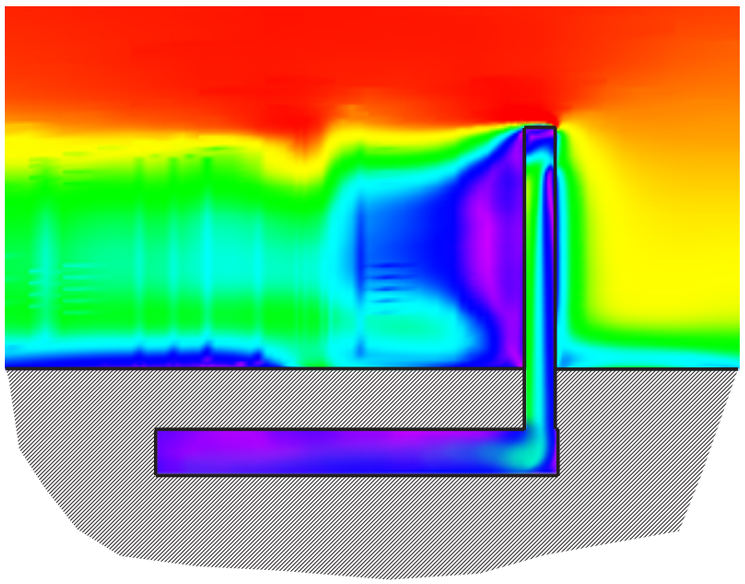


Figura 27 (pagina precedente) Sezioni delle velocità. Dati estrapolati dal software VENTO.
Figura 28 Sezioni delle temperature. Dati estrapolati dal software VENTO.

La configurazione analizzata prevede la chiusura delle torri di estrazione mentre saranno aperte e attive solo la torre 1 e la torre 5, le cui aperture sono rivolte verso il flusso del vento. Infatti il sistema prevede la presenza di un sistema meccanico di apertura e chiusura delle torri del vento in funzione sia della direzione del vento che delle condizioni degli ambienti interni. In conclusione, dai risultati ottenuti dalla simulazione fluidodinamica si nota come, dal diagramma delle velocità (m/s), il flusso d'aria entri all'interno della torre con valori elevati (2,5 m/s) per poi ridursi a 0,5 all'interno della cisterna e negli altri locali interni. Dalla visualizzazione delle temperature si evince che i valori di temperatura minori si trovano in corrispondenza del pelo dell'acqua nella cisterna e nell'angolo sottostante al condotto che collega la cisterna alla sala fredda. Alla fine della simulazione si conferma la possibilità di raffrescare entrambi gli ambienti del frigidarium con un flusso d'aria a 25,3 °C.

Note:

1 da S. M. Moossavi, 2011
2 E. Sapei, *2011*
3 www.echelman.com, consultato il 3/11/2017
4 Pinuccio Sciola e il cantico delle pietre, www.arte.rai.it, consultato il 3/11/2017
5 cit. Anthony Howe, *Kinetic Wind-Powered Sculptures* ,www.howeart.net, consultato il 3/11/2017
6 E. E. D. Pearlmutter, 2012
7 dati riportati dal sito weatherbase.com, consultato il 2/2/18
8 M. Mohammed Shah, *Methods for Calculation of Evaporation from Swimming Pools and Other Water Surfaces*, ASHRAE, 2014

Bibliografia

E. Bartolucci, *Progettare la piscina. Pianificazione tipologia tecnologie normativa*, Alinea editrice, Firenze, 1999

J. Bouillot, *H.A.M.M.A.M Project and Climate Design of Islamic Bath Building*, PLEA2006, The 23rd Conference on Passive and Low energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006

G. Campanini, *Impianti Natatori*, Edizioni Sportive Libertas Torino, Torino, 1984

M. Grosso, *Il raffrescamento passivo degli edifici. Concetti, procedimenti architettonici, criteri progettuali, metodi di calcolo e casi studio*, Maggioli editore, Rimini, 1997

A. Howe, *Kinetic Wind-Powered Sculptures* ,www.howeart.net, consultato il 3/11/2017

M. Mohammed Shah, *Methods for Calculation of Evaporation from Swimming Pools and Other Water Surfaces*, ASHRAE, 2014

Seyed Morteza Moossavi, *Passive Cooling Systems for Hot-Arid Climate in Islamic Iranian Architecture*, International Conference on Islamic Arts and Architecture 5th Edition, New Delhi, 2011

J. Neila, *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*, 2004

E. E. D. Pearlmutter, T. Williamson, *Urban microclimate: designing the spaces between buildings*, Routledge, 2012

R. Prola, *Piscine*, Dario Flaccovio editore, Palermo, 2009

E. Sapei, *La vegetazione e il comfort ambientale negli spazi aperti urbani*. Rel. Giuseppe Roccasalva, Jean Marc Christian Tulliani. Politecnico di Torino, Corso

di laurea magistrale in Architettura per il progetto sostenibile, 2015

R. A. Staccioli, *Le Terme di Roma antica*, Tascabili economici newton, 1995

W. Weber, S. Yannas, *The historic hammams of Damascus and Fes, in Lessons from vernacular Architecture*, earthscan editore, Abingdon, 2014

W. Weber, S. Yannas, *Climatic design of Islamic bath buildings, in Lessons from vernacular Architecture*, earthscan editore, Abingdon, 2014

F. Yegül, *Baths and bathing in classical antiquity*, Mit press, 1992

Sitografia:

www.echelman.com, consultato il 3/11/2017

Pinuccio Sciola e il cantico delle pietre, www.arte.rai.it, consultato il 3/11/2017

Conclusione

Dal lavoro di tesi e dalla analisi effettuate posso dire che calarsi in una realtà come quella dell'Iran, così culturalmente e architettonicamente diversa da quella europea, comporta il dovere di studiare approfonditamente la storia e la cultura del luogo. Con la stesura dei primi tre capitoli si sono delineati i punti di partenza e le linee guida per poter progettare in un contesto islamico e persiano. L'Iran infatti non può essere identificato solo come un paese arabo e islamico; sebbene la conquista islamica sia stata quella più profonda e imparagonabile a qualsiasi altra nella storia del paese. La Persia mantiene radici zoroastriane e orientali, che la avvicinano all'India e ai paesi asiatici. Per questa combinazione e intreccio di culture si può dire che le città iraniane presentino caratteristiche varie ed uniche.
Le condizioni climatiche estreme hanno contribuito alla formazione del patrimonio architettonico che risponde prontamente alle esigenze di ombreggiamento, ventilazione e umidificazione degli ambienti.

Progettare con la fluidodinamica richiede conoscenze molto approfondite che difficilmente un architetto possiede, perciò è di fondamentale importanza la condivisione del lavoro con un team di esperti.
Un architetto che si confronta con queste tematiche deve tenere bene a mente che la libertà compositiva non è mai fine a se stessa ma deve essere proiettata a trovare soluzioni che traducano i fenomeni fisici in forma architettonica. Progettare senza l'utilizzo di impianti ad energie non rinnovabili richiede uno sforzo maggiore che va ben oltre il disegno del vano degli impianti. Progettare con la ventilazione naturale significa che ogni scelta, ogni spazio deve essere inteso come componente di un unico grande organismo che non può essere smembrato o fatto a pezzi. Ogni spazio e decisione progettuale ha un ruolo specifico che influenza gli altri.

Nel progetto del hammam le linee sinuose della copertura consentono alle brezze di planare ed accarezzare la superficie senza generare aree di turbolenza; le cupole accelerano i moti convettivi dell'aria e favoriscono la fuoriuscita di quella più calda e viziata. Ogni torre del vento ha una specifica funzione: le due torri collegate alle sale umide presentano sistemi di umidificazione dell'aria; la torre della sala secca ha sezione a condotto multiplo poiché svolge la funzione di immissione ed estrazione del flusso. Le cinque torri collegate alla cisterna d'acqua sotterranea prediligono ciascuna una direzione opposta per garantire una continua entrata ed uscita dell'aria. Nel tepidarium l'ambiente viene mantenuto mite grazie all'aria proveniente da un condotto sotterraneo, catturata precedentemente da una torre del vento situata nel giardino. Tutte le sale del complesso sono disposte secondo gli assi geografici: il calidarium si trova sul lato sud, mentre il frigidarium in quello nord. Inoltre la disposizione dei percorsi è stata studiata per diminuire al minimo gli scambi termici tra una stanza e l'altra e con l'esterno.
I patii traducono in forma architettonica il raffrescamento microclimatico poiché grazie all'ombreggiamento delle facciate, la presenza di vegetazione e di specchi d'acqua, riducono sensibilmente la temperatura esterna.
Nel giardino sono state previste diverse attrazioni: nelle aree espositive verranno installate le opere d'arte di artisti internazionali che lavorano con il vento, come Echelmann e Sciola; le passerelle offrono un magnifico panorama sulla città e permettono di far capire al visitatore come l'altitudine influisca sulla percezione delle brezze fresche. Le torri evaporative traducono in architettura il raffrescamento evaporativo, aumentano l'umidità dell'aria circostante e profumano di aromi gradevoli la zona. Infine la sala del cielo notturno sintetizza il raffrescamento geotermico e radiativo. Simula le condizioni climatiche più miti della notte e immette nella sala l'aria rinfrescata catturata da una torre del vento e proveniente da un condotto sotterraneo.

Alla fine di questo percorso posso dire che progettare con il vento significa adottare soluzioni diverse che non possono essere scelte a priori ma che cambiano a seconda della forma architettonica e alle condizioni bioclimatiche da raggiungere. Il concetto di comfort risulta essere molto variabile poiché dipende strettamente dalle sensazioni e dalle risposte fisiche e psicologiche dell'ospite. Di conseguenza un'architettura bioclimatica volta al raffrescamento naturale non può avere risposte univoche certe, ma soluzioni specifiche ideate caso per caso, amalgamate armoniosamente tra loro.

Ringraziamenti

Attendo questo momento da quando, dopo l'estate del diploma, ho deciso che sarei diventata un architetto. Mi ricordo che la scelta si è presentata netta, precisa e limpida. Non conoscevo il significato del termine "architettura", non avevo idea di cosa potesse comportare. Mi sono innamorata di lei senza nemmeno conoscerla.
È stato amore a prima vista e da allora non ci siamo più lasciate.
C'è chi dice che arriva il momento in cui ci si pente di aver scelto di essere architetto, ma io non sono ancora arrivata a quel punto ed è così che voglio ricordare questo momento: non sono mai stata più felice di adesso. Ho coronato il mio sogno!

Ringrazio per primi i miei genitori, mamma Lucia e papà Davide, che mi hanno permesso di realizzare questo sogno, ma soprattutto grazie perché mi hanno insegnato che i traguardi si raggiungono sempre e solo dando il meglio di se stessi.
Ringrazio tutti i professori che mi hanno accompagnato nel mio lavoro finale, Marco Simonetti, per la parte di fluidodinamica, Alessio Battistella per quella compositiva e Francesca Olivieri, per la parte storica, bioclimatica e per il sostegno durante il mio percorso a Madrid. Grazie a Marco Rossi e Marco Mulas che mi hanno aiutato nella parte di utilizzo del software VENTO e a Fabio Restagno che mi ha dedicato molte ore nella stesura delle parti più tecniche.
Grazie a mia sorella Marina e a Giacomo, alla zia Maria Teresa e alla nonna

Gina, a lei dedico tutta la mia tesi.
Un grazie speciale va a Giusi e Antonella, donne e sorelle della mia vita. Grazie perchè senza di voi nulla sarebbe stato lo stesso.
Grazie a Matteo, per avermi preso la mano e aperto le porte del suo cuore.
A Roberto, compagno di avventure spagnole, coinquilino paziente e amico fedele.
A Elisa e Regina, amiche e colleghe fidate in tutti questi cinque anni di studio.
Ringrazio Francesca, Alessia, Greta, Alice, Silvia, Annalucia e Annamaria: coinquiline con i quali ho condiviso pezzi di vita quotidiana. Un grazie anche agli amici e compagni di corso di questi ultimi anni: Andrea, Pasquale, Luca, Marta, Chiara, Silvia, Giulia, Valeria, Francesco e Paola. Ai compagni di erasmus Aprilia, Leonardo, Martin, Marika, Mauro e Ivaylo.
E alla fine grazie Torino, città che mi ha fatto scoprire il mondo e che mi ha trattato come una figlia. Grazie perché mi hai fatto conoscere persone straordinarie che ogni giorno migliorano la mia vita.

Grazie, davvero.

Elisa