

Una anàlisi física de l'arquitectura

Jaume Roset Calzada i Antoni Isalgué Boixeda*

Departament de Física Aplicada. ETS d'Arquitectura de Barcelona. UPC

Introducció

Qui llegeixi aquest article segurament ho farà a l'interior d'un edifici, a cobert de les inclemències del temps i amb unes condicions relativament confortables. Protegir-se de les incomoditats del temps (fred, pluja, calor...) de forma estable dóna lloc a l'arquitectura. Exposarem tot seguit algunes relacions entre la física com a ciència i l'arquitectura, que s'ocupa de realitzacions concretes amb tots els aspectes que cal considerar—economia, satisfacció humana, legislació... Els problemes que es plantejen en arquitectura no són diferents dels que es troben a algunes branques de les ciències naturals, però hi ha gran quantitat de variables i fenòmens, molts mal coneguts, que interaccionen entre si amb efectes no concurrents. No hi intervenen sols les condicions externes més evidents com l'economia, la climatologia o les característiques mecàniques dels materials de construcció, sinó que hi ha més factors com ara: l'envelliment — recordem els problemes relacionats amb el ciment aluminós—, els accidents —terratrèmols, inundacions...—, els efectes secundaris —per exemple, la possible contaminació produïda per algunes moquetes...

Com comença l'arquitectura? Quan fa molts anys els homes van començar a construir per ells mateixos refugis per defensar-se de les inclemències externes, es va iniciar l'etapa del domini de l'espai per a activitats humanes: apareixen els primers edificis, i més tard els entramats urbans (Zevi, 1981). Paral·lelament es va desenvolupant amb el temps un sentit estètic capaç d'apreciar la coherència de les formes. Aquest sentit estètic es contraposarà moltes vegades a uns condicionants econòmics. Pel fet de considerar un espai habitable sorgeixen diferents aspectes:

- a. El domini de l'espai necessita un plantejament de les sol·licitacions mecàniques a què es troba sotmès un edifici i el que les suporta, l'estructura. El que fa referència a l'estudi de les sol·licitacions mecàniques i al problema resistent conforma l'estàtica i la resistència de materials.

- b. En un refugi es plantegen els problemes de confort-comodat, entès com la capacitat de realitzar certes tasques sense un esforç extraordinari (Banham, 1975) —per exemple, estar calent sense haver-se de moure constantment. Cal considerar també la qualitat de l'espai: estar net, sec i calent ajuda fortament a augmentar les possibilitats de supervivència. El que hi contribueix directament —instal·lacions d'aigua, electricitat, calefacció...— forma el nucli del que anomenem condicionaments i serveis d'un edifici.
- c. La bondat d'una realització arquitectònica mai no s'avalua solament per uns valors numèrics, sinó per l'opinió dels ocupants, amb un seguit de condicionants i singularitats de cada persona. Això implica la fisiologia, la percepció humana, la psicologia i, fins i tot, la moda.

Tot i que l'arquitectura s'ha considerat molt freqüentment un art, après amb l'experiència de l'arquitecte-constructor-mestre d'obres per assaig i error (pensem, per exemple, en les catedrals gòtiques), indiscutiblement les possibilitats constructives han estat fortament condicionades pels avenços de la ciència i la seva aplicació tècnica.

Seguidament tractarem alguns punts de la relació entre física i arquitectura, mostrant algunes de les raons que fan els problemes especialment complicats. Després desenvoluparem com a exemple un cas concret que mostra un resultat d'aquestes consideracions.

Física i arquitectura

L'aportació de la física com a ciència a l'arquitectura és intentar entendre —i si és possible descriure predictivament— els fenòmens implicats en la construcció, el funcionament i l'ús dels edificis per poder proposar solucions que, amb el mínim cost, donin la màxima durada i satisfacció. La realització pràctica de les solucions proposades ens porta a la tecnologia. Els punts esmentats —domini de l'espai, confort-comodat i apreciació de les persones— fan que haguem de considerar la mecànica, els fluxos energètics i el confort integrat en els edificis.

*Jaume Roset Calzada (Barcelona, 1959) és llicenciat en física per la Universitat de Barcelona (1982) i actualment és professor titular d'escola universitària a l'Escola d'Arquitectura de Barcelona. Antoni Isalgué Boixeda (Barcelona, 1958) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona (1984) i és professor titular d'universitat a l'Escola d'Arquitectura de Barcelona

Quan l'objectiu és aconseguir amb una seguretat i un cost adients l'estabilitat de l'edifici sota l'efecte de les diferents càrregues (forces), tant estàtiques (pes propi, mobles...) com dinàmiques (vent, moviments del terra...), a què es pot trobar sotmès, el tractament aportat per la física a aquesta part consisteix en l'aplicació de les lleis de la mecànica i el comportament físic dels materials a diferents sistemes de cossos. Per resoldre un d'aquests sistemes, el que es fa és imposar-li unes restriccions de moviment en forma de lligams externs capaços de suportar les forces exteriors, i provocar així unes forces i deformacions tolerables. Els valors de les forces que han de suportar els lligams, els esforços interiors i les deformacions són normalment les incògnites que s'han de determinar, variables de disseny.

L'aplicació pot resultar de dues formes diferents. En algunes situacions les equacions de l'estàtica que se'n deriven són suficients per obtenir en una primera fase les forces aplicades sobre tots els elements. Posteriorment es poden aplicar les lleis que expressen el comportament mecànic dels materials per calcular les deformacions resultants. Hi ha un altre tipus de problemes on les lleis de la mecànica diuen que hi pot haver moltes solucions: són els sistemes anomenats hiperestàtics, que són els més corrents. Per exemple, una cadira pot sostenir-se sobre tres potes de forma única, però si té quatre potes, les lleis de l'estàtica no permeten determinar per si soles les forces a les potes. En aquests casos, cal utilitzar les equacions de la mecànica i les del comportament físic dels materials per trobar les forces i les deformacions. Els problemes que poden portar aquests sistemes els il·lustrem a continuació amb un exemple senzill.

Considerem el sistema de barres rectes lleugeres articulades de la figura 1. Les barres són d'acer, de 4 m de longitud i tenen una secció de 20 cm². A les articulacions B i D hi ha aplicades dues càrregues verticals cap a baix de valor $P = 300.000$ N.

En el cas a), el sistema està articulat (és a dir, té impedit els moviments horitzontals i verticals, però no el gir) en el punt A i simplement recolzat (té el moviment perpendicular al terreny impedit) en el punt E. Sota aquestes condicions l'aplicació de les lleis de Newton (condicions d'equilibri) per a cada barra dona un sistema d'equacions que permet determinar els valors de les reaccions externes, les tensions a totes les barres i l'allargament o escurçament de tots els elements que donen lloc a l'estructura deformada.

Si suposem ara que, per efecte de les forces, les barres es deformen de manera elàstica i lineal d'acord amb la llei de Hooke, podem trobar a partir de les propietats de l'acer que el punt C baixa $y_C = 5,7$ mm.

Ara bé, els corriments observats són petits comparats amb les longituds de les barres. És possible que el sistema es trobés molt a prop del terra pel centre; ve-

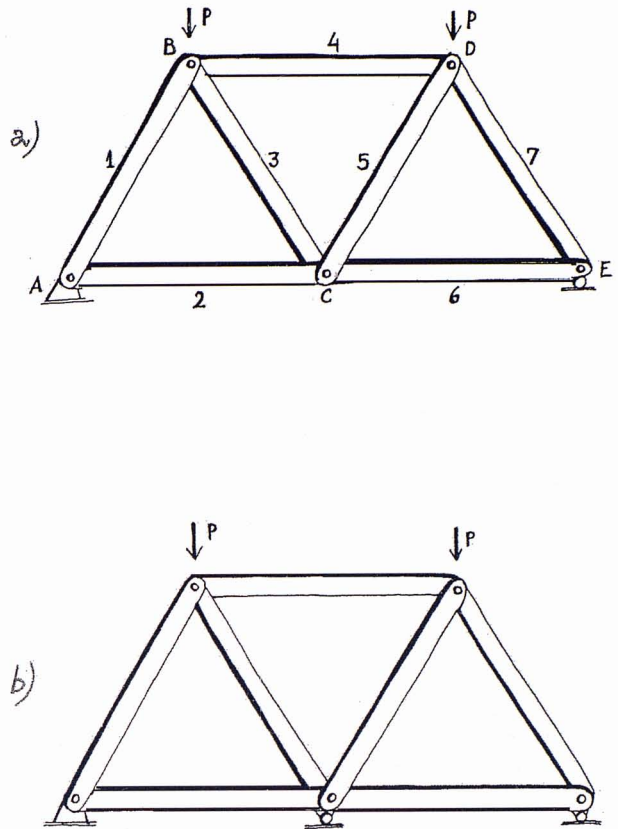


Figura 1: a) Sistema de barres articulades suportat en A i E. b) El mateix sistema suportat en A, C i E

gem què passaria si el sistema toqués el terreny — suposat indeformable— en el punt C. Aquest contacte pot ser modelitzat com un recolzament simple en l'esmentat punt C (figura 1, cas b). La dificultat està en el fet que s'ha afegit una incògnita més (la reacció en C del terra) sense canviar el nombre d'equacions de l'estàtica. Ara el conjunt és hiperestàtic.

L'equació que ens manca es dona perquè existeix una relació de compatibilitat geomètrica entre totes les deformacions (les deformacions dels diferents cossos no són independents, perquè les peces continuen unides formant un conjunt). En aquest cas, la reacció en el punt C és la que cal per evitar que aquest punt baixi y_C . A la taula 1 es presenten els resultats (significatius fins als kN) comparats (vegeu Den Hartog, 1961, o Hirschfeld, 1975).

En aquest exemple es pot veure com un canvi molt petit de condicions (de l'ordre d'1 cm comparat amb les barres de 4 m) provoca resultats molt diferents. Així dues barres que en la part a) no suporten cap força, en

F/kN	a	b
FA	300	136
FC	—	327
FE	300	136
F1	-346	-157
F2	+173	+79
F3	0	-189
F4	-173	+15
F5	0	-189
F6	+173	+79
F7	-346	-157

Taula 1: Forces suportades per les barres (els valors negatius indiquen compressió)

la part b) passen a ser les més sollicitades i una de les barres passa d'actuar a compressió a fer-ho a tracció.

Cal comprendre aleshores que, tot i que a la mecànica de la construcció tractem amb sistemes deterministes, pel desconeixement de totes les condicions es fa necessari l'ús habitual de coeficients de seguretat, que resulten en el sobredimensionament dels elements que formen les estructures resistents, per poder suportar canvis aparentment petits a les condicions en què es poden trobar. També s'utilitzen coeficients de seguretat per garantir la resposta de les estructures a accions extraordinàries com terratrèmols, forces inusuals de vents...

Fluxos energètics

Si, d'altra banda, l'objectiu és aconseguir que l'edifici pugui satisfer en grau suficient i a un cost raonable les necessitats de l'home que s'hi està, mitjançant l'aportació i distribució controlada de fluxos energètics (tèrmica, llum, acústica...), el tractament físic d'aquesta part portarà a l'estudi de diferents mecanismes de transferència d'energia i de massa, i als seus efectes, per aconseguir el màxim grau possible de satisfacció.

En conjunt, caldria considerar els fluxos i el possible emmagatzemament de l'energia. Moltes són les classes d'energia implicades: elèctrica, mecànica (ones de so, aparells en moviment), química (el gas que es pot cremar), radioactiva (radiació visible i infraroja)...; com també els transports de matèria existents (moviments de l'aire, aigües netes i residuals...). Tots aquests termes presenten una gran variabilitat pel que fa a la importància energètica i de repercussió sobre el confort humà.

Per raons històriques, per la seva importància per a la vida humana, i per les quantitats d'energia i potència implicades, la tèrmica és el camp que ha estat més estudiat.

El fet d'haver de situar l'edifici en un lloc on hi ha un

clima determinat farà que el tipus de comportament tèrmic sigui molt diferent d'uns casos a uns altres. Malgrat això, els fenòmens físics implicats són sempre els mateixos. Així, en tots els climes, hi haurà fenòmens evaporatius, intercanvis de calor per radiació, convecció i conducció; caldrà afegir-hi també l'acció tèrmica de la persona (com a productora/reguladora de calor i humitat) i conèixer com està relacionada aquesta acció amb el confort tèrmic.

En la figura 2 hi han representades dues situacions. En el cas a), s'ha indicat el balanç tèrmic d'una part d'un habitatge i, en el cas b), el balanç tèrmic d'una persona.

El problema tèrmic global és força complex. D'una banda, al nostre entorn hi ha molts materials, amb diverses propietats de transferència de calor i diferents temperatures a cada lloc; d'altra banda, els fluxos de calor tenen uns valors força importants i contraposats. Alguns ordres de magnitud d'aquests fluxos poden donar una idea de la complexitat del problema global. Així, la radiació solar en el rang visible assoleix fàcilment un valor de prop de 1.000 W m^{-2} (prop de la meitat de la superfície de la pell de la persona pot estar exposada a aquesta radiació). Un càlcul senzill (utilitzant la llei de Stefan-Boltzmann amb temperatures de l'ordre de l'ambient) dona valors del flux de radiació tèrmica emès per un cos de l'ordre de 500 W m^{-2} . Per contra, la producció de calor metabòlica (conseqüència de l'activitat de l'home) té com a valor habitual poc més de 100 W m^{-2} , i representa un xoc tèrmic que pot ser mortal si el desequilibri arriba a més de 500 W m^{-2} durant pocs minuts (Ramón, 1980). Per tant, hi ha un conjunt de valors de transferències tèrmiques que es compensen entre si i fan possible la vida. A la pràctica, la variabilitat de les condicions exteriors i la delicadesa de l'equilibri fan preveure els edificis amb un cert sobredimensionament, sigui en materials, sigui en un possible consum energètic.

Confort integrat

Tot i que hem esmentat un cert nombre de problemes importants, la realitat és més complexa encara: cal considerar també les condicions de lluminositat, acústiques, la comoditat mecànica i la composició de l'aire. A més, hi ha interaccions entre elles, que a vegades es realitzen de forma no conscient (fenòmens de sinestèsia) i d'altres es presenten com una elecció conscient. A la figura 3 n'hi ha un exemple.

A més, cal considerar les condicions diferencials entre persones, no sols fisiològiques sinó també de caire psicològic i cultural com la intimitat, la domesticitat, la comoditat d'ús (Rybczinski, 1989), per intentar garantir que la persona s'hi trobarà a gust.

Encara complica més la qüestió el fet que la persona pot, a més de rebre'n els efectes, fer accions. Quan en rep els efectes, l'home es pot considerar com un re-

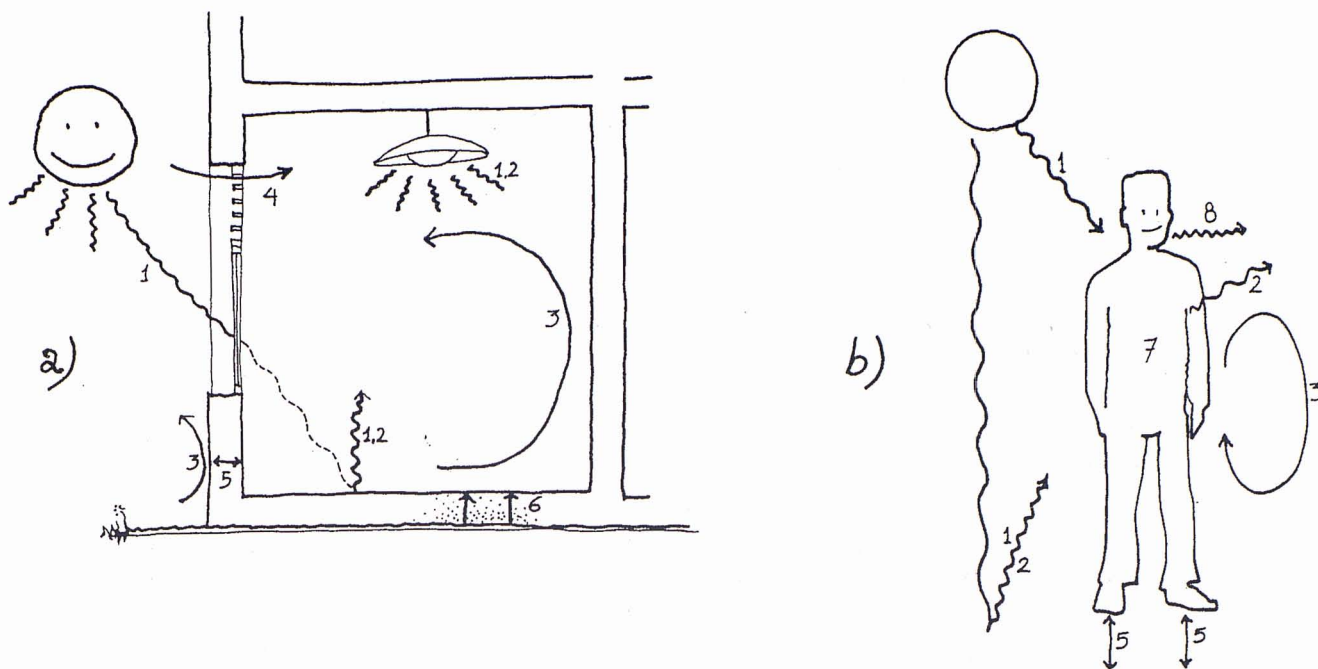


Figura 2: a) Balanç tèrmic d'una part d'un habitatge i b) balanç tèrmic d'una persona: (1) radiació en el rang visible, (2) radiació en l'infraroig, (3) intercanvi de calor amb l'aire, (4) infiltració d'aire, (5) conducció de la calor, (6) flux de vapor d'aigua, (7) generació de calor per l'home i (8) generació de vapor d'aigua per l'home

ceptor del qual cal conèixer, amb les consideracions estadístiques adients (Coch, 1990), si es troba o no en situació de confort. Però també pot actuar modificant el seu entorn de manera important, semblant a la forma com ho fan els sistemes realimentats, amb la complexitat afegida que representen els fenòmens de percepció i psíquics involucrats.

Lleis físiques i arquitectura

Com hem vist en els exemples anteriors i com es desprèn de qualsevol estudi detallat, les lleis de la física són vàlides i útils i, en concret, són a la base de la interpretació dels fenòmens involucrats a l'arquitectura. Però l'arquitectura involucra la mecànica, la geometria, el comportament dels materials, problemes energètics (temperatura, llum, so) i l'home i el seu comportament.

El resultat de tot el que hem esmentat és que la gran quantitat de fenòmens i variables que influeixen en l'arquitectura farà que les lleis físiques donin lloc a unes tendències en les relacions entre les magnituds en comptes de dependències precises. El sentit estadístic es troba per la multitud de fenòmens i variables implicades, i el poc coneixement que en tenim en general.

Per tal d'il·lustrar aquest efecte analitzarem algunes característiques de diferents edificis. Aquesta anàlisi hauria de portar a unes relacions o "lleis" que perme-

tessin posteriorment predir característiques d'altres edificis.

S'han triat edificis seleccionats i avaluats pel projecte Monitor de la Comunitat Econòmica Europea, descrits com "uns estudis de casos publicats (...) per mostrar com arquitectes i dissenyadors poden (...) produir edificis atractius i energèticament eficients" (Project Monitor, 1989). Els 24 edificis escollits d'entre els 49 que han estat avaluats, corresponen als edificis complets, sigui amb un de sol o amb més habitatges, dels quals han estat publicades dades suficients per fer-ne l'anàlisi. Els volums totals dels diferents edificis estan compresos entre 226 i 13.480 m³.

L'anàlisi de les relacions geomètriques generals mostra, per exemple, que hi ha una relació lineal (figura 4a) entre el volum (V) i la superfície de les plantes escalfades (S_{esc}). El coeficient de correlació obtingut és $r^2 = 0,990$. En l'esmentada relació el pendent, que té dimensions d'alçada, ens permet interpretar que totes les persones viuen en interiors d'edificis d'alçades mitjanes semblants, $2,80 \pm 0,10$ m segons l'ajust (la dispersió indica que les alçades són "semblants" i no "idèntiques" com es pot comprovar fàcilment visitant algunes cases).

També mostra que hi ha una relació lineal (figura 4b) entre el volum (V) i la superfície total en contacte amb

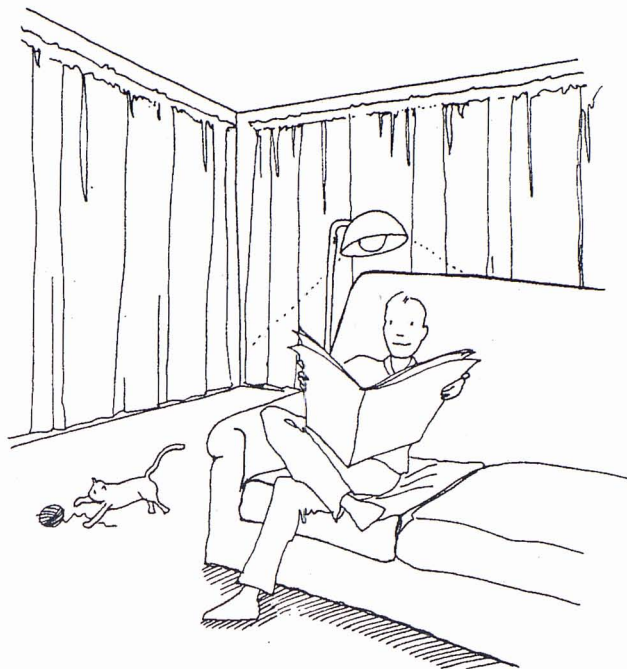
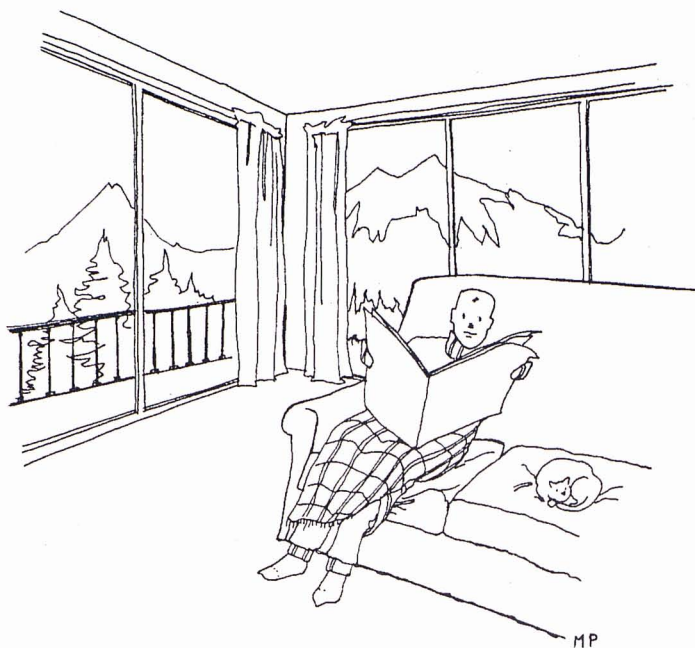


Figura 3: Pot donar-se la circumstància que una millora en l'ambient tèrmic tingui un cost visual (l'obstacle de la cortina). Què cal triar?

l'exterior o superfície de la pell de l'edifici (S_p). El coeficient de correlació és ara $r^2 = 0,968$. El valor d'aquesta relació o més exactament de la inversa (S_p/V) rep el nom de factor de forma f , que segons l'ajust realitzat val $0,43 \pm 0,04 \text{ m}^{-1}$. Les normes tèrmiques constructives europees, entre aquestes la NBE-CT-79 d'aplicació a l'Estat espanyol, utilitzen aquest factor dimensional com un dels paràmetres per especificar el valor màxim que pot tenir el coeficient de transmissió tèrmica global (KG) d'un edifici de nova construcció.

De tota manera, se sap que una forma d'optimitzar la informació física que es té d'un fenomen és intentar establir relacions adimensionals. Aquesta metodologia ha donat molts fruits en camps de complexitat elevada, com ara la mecànica de fluids.

Com a exemple d'aplicació a l'arquitectura, que és un camp força complex, considerem la relació entre volum i superfície de pell: aquesta relació és en el fons una caracterització de la forma. La forma, tal com s'entén habitualment, no hauria de fer referència a la grandària absoluta, i per tant s'ha de definir amb un seguit de paràmetres que es conservin amb les homotècies, com la compacitat, l'esveltesa i la porositat (Roset, 1989; Serra, 1990). En aquest cas, la relació que s'ha de considerar és un paràmetre de compacitat, per exemple la relació entre el volum elevat a $(2/3)$ i la superfície de pell (S_p). El resultat per als edificis considerats és que tenen una

compacitat de $0,098 \pm 0,009$, que es tracta d'edificis fets amb un cert criteri; l'ajust de la recta (figura 4c) ho reflecteix (coeficient de correlació $r^2 = 0,979$).

Tots aquests resultats mostren que els edificis analitzats combinen els paràmetres geomètrics de forma amb una tendència a mantenir una compacitat sensiblement constant. Però també hi ha una altra tendència a mantenir la relació volum a superfície de pell, de manera que la forma general tendeix a variar amb el volum. Les dues relacions arrossegueuen un marge d'indeterminació, però aplicades alhora semblen poc compatibles. Això mostra que és més prudent considerar unes tendències o lleis difuses quan tractem relacions en arquitectura.

Quan s'introdueixen consideracions físiques, es pot considerar, per exemple en el camp de la tèrmica, l'energia necessària per mantenir una certa temperatura interior segons el clima (energia necessària per grau dia, vegeu l'annex 1). Es pot veure (figura 5) que dona, la superfície de pell S_p , una relació lineal (coeficient de correlació $r^2 = 0,953$). Això es podria interpretar en el sentit que correspon al fet que els edificis estan aïllats d'una manera que està força d'acord amb les característiques del lloc on es troben situats.

El valor del pendent de la recta de la figura 5 ens dona el coeficient de transmissió tèrmica mitjà dels edificis analitzats, equivalent a $1,06 \pm 0,15 \text{ W m}^{-2} \text{ C}^{-1}$. Comparant el valor obtingut amb els valors del coefi-

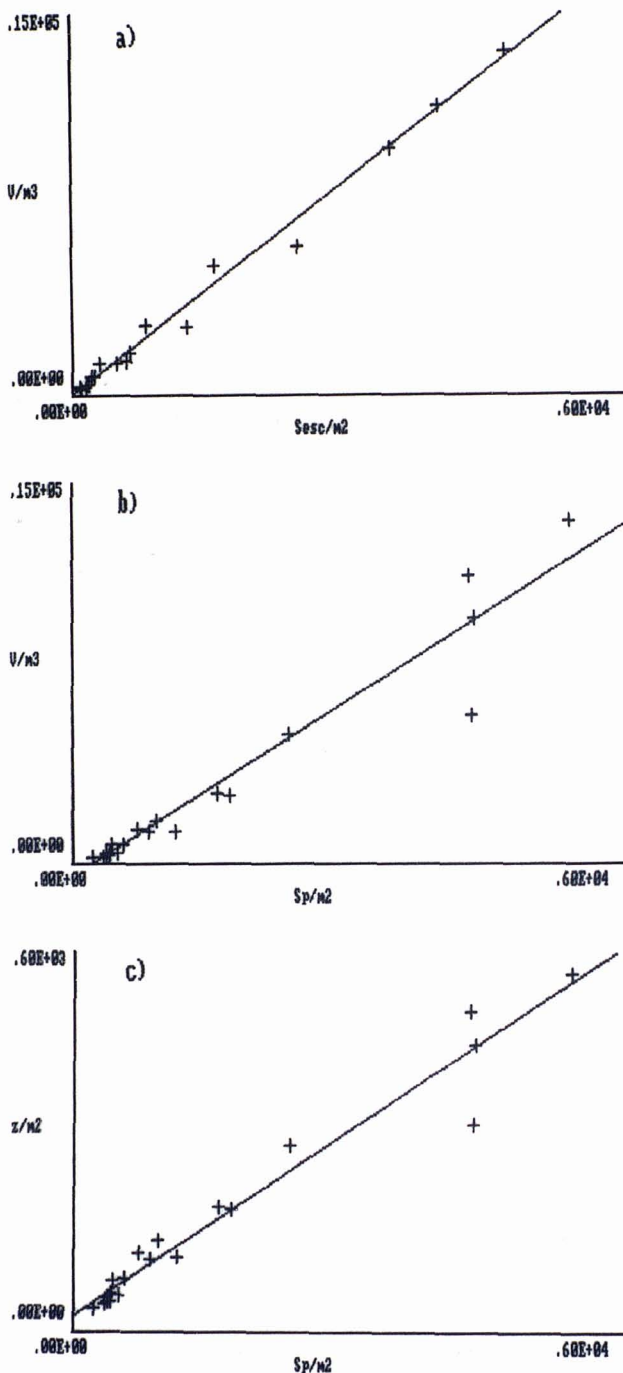


Figura 4: a) Volum de l'edifici (V) en funció de la superfície de planta escalfada (S_{esc}). b) Volum en funció de la superfície de pell de l'edifici (S_p). c) Volum elevat a $2/3$ ($z = V^{2/3}$) en funció de (S_p).

cient de transmissió tèrmica global proporcionats per la norma espanyola NBE-CT-79 (disposem de poques dades per fer aquesta comparació amb els apartats de la norma catalana NRE-AT-87), s'ha vist que el conjunt dels edificis compleix clarament la norma, llevat de dos casos d'edificis que es troben en el límit.

Cal tenir present que els edificis analitzats tenen una transparència o relació de superfícies transparents (finestres) a superfície de pell superior a l'habitual al nostre país, fet relacionat amb la climatologia i els criteris de disseny en tots aquests edificis. A més, en el càlcul del coeficient de transmissió tèrmica global K_G segons la norma espanyola s'introdueixen uns factors de ponderació per a les cobertes i els terres que penalitzen els edificis que hem analitzat.

La dispersió existent en tots els gràfics apareix com a resultat de la multitud de fenòmens i singularitats, que no es tenen en compte quan es fa una anàlisi genèrica. Aquest fet indica que una descripció en termes de magnituds globals mostrarà unes tendències (o lleis difuses) i no unes relacions molt precises, quan tractem temes d'una complexitat elevada com ara en arquitectura.

Conclusions

La física ha aportat sistematització de coneixements, racionalitat i innovació a l'art de l'arquitectura. Les contribucions històriques han afectat especialment la tècnica constructiva, la mecànica, les propietats dels materials, l'energètica i el condicionament dels edificis.

L'arquitectura és un camp especialment complex. Algunes de les raons que fan que els problemes plantejats siguin diferents dels que podríem considerar "habituals a la física" són la sensibilitat, extrema en alguns casos, a les condicions de contorn, i la gran quantitat de variables existents, moltes de forta repercussió en els resultats. A més, les persones mostren una gran diversitat i són un subjecte actiu, que té no sols una valoració de la realitat, sinó també una activitat que pot resultar decisiva en molts casos.

Hem analitzat algunes dades d'edificis d'habitatges dins de la Comunitat Europea seleccionades dins del Projecte Monitor. Com a conclusió d'aquesta anàlisi, en totes les relacions obtingudes entre diferents magnituds es pot veure que és més adient parlar de tendències que no pas de relacions exactes, i que és necessari aplicar un sentit estadístic quan parlem de magnituds globals com ara el consum, o el volum de l'edifici.

Annex

Per a una determinada construcció, es pot assumir que la transmissió de calor és proporcional a la diferència de temperatures entre l'interior i l'exterior. Per caracteritzar la temporada de calefacció s'utilitzen els graus-dia (GD), que són un valor que dóna informació sobre les condicions de temperatura d'un determinat lloc. La

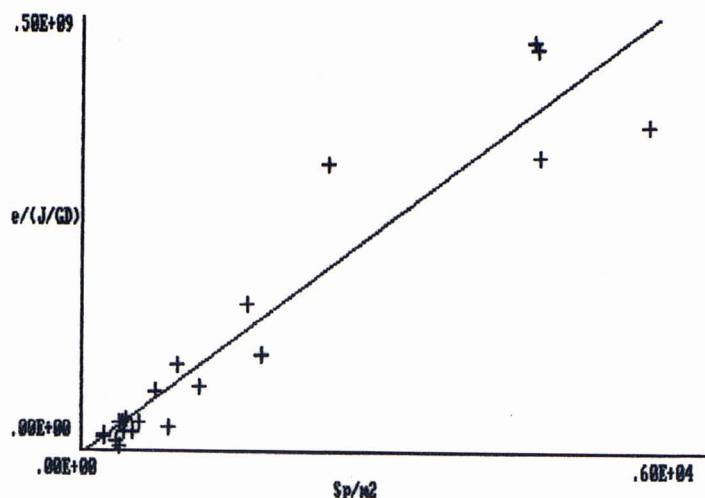


Figura 5: Energia necessària per grau-dia per mantenir una certa temperatura interior (J/GD), en funció de la superfície de pell (S_p).

definició és

$$GD = - \sum_d (T - T_B)$$

on la suma s'estén per als dies d en què $(T - T_B) < 0$.

T és la temperatura mitjana d'un dia i T_B , una temperatura de referència a la qual se suposa que el confort és acceptable (normalment 18°C). A tall d'exemple, els graus-dia en base 18 són 2.870 a Esterrri d'Àneu i 1.235 a Barcelona.

Bibliografia

- BANHAM, R., *La arquitectura del entorno bien climatizado*, Infinito (Buenos Aires, 1975).
- COCH, H. et al., "Thermal Comfort and Building Skin Fitting in Mediterranean Climates", *Proc. of ISES Conference on evolution of external perimetral components in bioclimatic Architecture*, pàg. 277 (1990).
- DEN HARTOG, J.P., *Strength of Materials*, Dover (Nova York, 1961).
- HIRSCHFELD, K., *Estática en la construcción*, Reverté (Barcelona, 1975).
- Project Monitor Case Studies* CEC Directorate-General XII, Bruselles (1987-1989).
- RAMON, F., *Ropa, sudor y arquitecturas*, Blume (Madrid, 1980).
- ROSET, J., ISALGUE, A. i SERRA, R., "Análisis dimensional. Aplicaciones en arquitectura", *XXII Bienal de la RSE de Física*, vol. 2, pàg. 345 (1989).
- RYBCZYNSKI, W., *La casa. Historia de una idea*, Nerea (Madrid, 1989).
- SERRA, R., ISALGUE, A. i ROGORA, A., "Application of Dimensional Analysis to the Characterization of Building Skin", *Proc. of ISES Conference on evolution of external perimetral components in bioclimatic Architecture*, pàg. 297 (1990).
- ZEVI, B., *Saber ver la Arquitectura*, Poseidón (Barcelona, 1981).