

7. CALCOLO DEL FABBISOGNO ENERGETICO NORMALIZZATO (FEN) D.P.R. 412 /1993 – ART. 8 – COMMI 1/2

Volume ambiente climatizzato (V): 526 m³
temperatura interna (valore di progetto): 20 °C

Si tratta di definire il fabbisogno di energia stagionale per un edificio in relazione al suo impianto termico.

Si tiene conto degli apporti positivi, ossia quelli gratuiti dovuti all'irraggiamento solare, alla presenza dell'impianto termico, all'illuminazione, agli utenti, e degli apporti negativi, ossia le perdite dovute alla trasmittanza dell'edificio stesso attraverso i disperdenti, alla ventilazione, al rendimento dell'impianto.

$$FEN = \frac{Q}{GG \times V} \quad \text{in KJ/ GGm}^3$$

dove :

Q : quantità di energia primaria necessaria a mantenere la temperatura nei locali costante durante l'anno, con un ricambio d'aria adeguato;

V : volume dell'edificio al lordo delle strutture nella porzione di spazio delimitata dall'edificio e riscaldata da un unico impianto (abbiamo assunto un'unica zona termica ed un'unica unità esterna a pompa di calore);

GG : gradi giorno dipendenti dalla località ;

che può essere espressa con :

$$\frac{Q}{(\vartheta_i - \vartheta_{em}) \times N \times V}$$

dove :

Q : fabbisogno energetico convenzionale stagionale di energia primaria richiesto per il riscaldamento, in KJ.

ϑ_i : temperatura interna di progetto dei singoli locali, in °C . **20 °C**

ϑ_{em} : temperatura media stagionale dell'aria esterna, in °C . **10,3 °C**

N : n° di giorni del periodo di riscaldamento, in gg. **166 gg**

V : volume dell'edificio al lordo delle strutture nella porzione di spazio delimitata dall'edificio e riscaldata da un unico impianto , in m³ **526 m³**

ϑ_i	ϑ_{em}	N	V
20	10,3	166	526

Zona D : dal 1° novembre al 15 aprile

Per il nostro edificio è stato utilizzato un solo impianto (è stata considerata un'unica zona termica con un'unica unità esterna a pompa di calore) perciò dobbiamo calcolare un solo valore di FEN.

Verifichiamo ora quale metodo, tra i tre (A, B, C) va utilizzato per calcolare il nostro FEN.

CALCOLO DELL'INDICE VOLUMICO DEGLI APPORTI GRATUITI

Θ_e = indice volumico degli apporti gratuiti

$$\Theta_e = \frac{A_{eq} * I_m}{V} + a \quad \text{in W/m}^3$$

A_{eq} = area equivalente soleggiata dell'edificio m^2

I_m = irradianza media stagionale sul piano orizzontale W/m^2

V = volume dell'edificio individuato dalla porzione di spazio, al lordo delle strutture, delimitata dall'involucro edilizio e riscaldata con energia prodotta da un unico impianto (in m^3)

$A_{eq \text{ nord}} = \sum 0,35(A_w * \tau)$ per disperdenti esposti a Nord

$A_{eq \text{ sud}} = \sum 1,35(A_w * \tau)$ per disperdenti esposti a Sud

$A_{eq \text{ est, ovest}} = \sum 0,74(A_w * \tau)$ per disperdenti esposti a Est e Ovest

A_w = area delle superfici vetrate compresa l'area dei telai

τ = coefficiente globale di trasmissione solare = $0,87 * F_o * F_a * F_c * g$

dove:

F_o = fattore o coefficiente di ombreggiatura dovuto, quando presente, a costruzioni esterne limitrofe

F_a = fattore di schermatura dovuto, quando presente, ad aggetti orizzontali

F_c = fattore di schermatura o coefficiente di riduzione dovuto, quando presente, al tipo di oscuramento previsto per l'infisso

g = trasmittanza solare dell'elemento vetrato (di norma fornita dal costruttore)

ESPOSIZIONE A SUD

Finestra 3

$$F_o = 1 \quad s = 0 \quad F_a = 0,87 \quad F_c = 0,8 \text{ (valore convenzionale)}$$

$$g = 0,70 \text{ (doppio vetro normale)}$$

Con:

$$\tau = 0,87 * 1 * 0,87 * 0,80 * 0,70 = 0,424$$

$$A_w = 15,37 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum(A_w * \tau) = 15,37 * 0,424 = 6,515 \text{ m}^2$$

Finestra 1

$$F_o = 1 \quad s = 0 \quad F_a = 1 \quad F_c = 0,80 \text{ (valore convenzionale)}$$

$$g = 0,70 \text{ (doppio vetro normale)}$$

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 1 * 0,80 * 0,70 = 0,487$$

$$A_w = 4,56 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum(A_w * \tau) = 4,56 * 0,487 = 2,221 \text{ m}^2$$

Finestra 2a

$$F_o = 1 \quad s = 0 \quad F_a = 1 \quad F_c = 0,80 \text{ (valore convenzionale)}$$

$$g = 0,70 \text{ (doppio vetro normale)}$$

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 1 * 0,80 * 0,70 = 0,487$$

$$A_w = 3,8 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum(A_w * \tau) = 3,8 * 0,487 = 2,036 \text{ m}^2$$

Finestra 2b (porta-finestra verticale)

$$F_o = 1 \quad s = 0 \quad F_a = 1 \quad F_c = 0,80 \text{ (valore convenzionale)}$$

$g = 0,70$ (doppio vetro normale)

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 1 * 0,80 * 0,70 = 0,487$$

$$A_w = 3,22 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum 1,35 (A_w * \tau) = 1,35 (3,22 * 0,487) = 2,117 \text{ m}^2$$

Finestra 4 (disperdente verticale)

$$F_o = 1 \quad s = 0 \quad F_a = 1 \quad F_c = 0,80 \text{ (valore convenzionale)}$$

$g = 0,70$ (doppio vetro normale)

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 1 * 0,80 * 0,70 = 0,487$$

$$A_w = 0,8 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum 1,35 (A_w * \tau) = 1,35 (0,8 * 0,487) = 0,526 \text{ m}^2$$

Finestra 5 (disperdente verticale)

$$F_o = 1 \quad s = 0 \quad F_a = 1 \quad F_c = 0,80 \text{ (valore convenzionale)}$$

$g = 0,70$ (doppio vetro normale)

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 1 * 0,80 * 0,70 = 0,487$$

$$A_w = 1,9 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum 1,35 (A_w * \tau) = 1,35 (1,9 * 0,487) = 1,249 \text{ m}^2$$

ESPOSIZIONE A NORD

Finestra 1

$$F_o = 1 \quad s = 0 \quad F_a = 1 \quad F_c = 0,80 \text{ (valore convenzionale)}$$

$g = 0,70$ (doppio vetro normale)

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 1 * 0,80 * 0,70 = 0,487$$

$$A_w = 4,14 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum (A_w * \tau) = (4,14 * 0,487) = 2,016 \text{ m}^2$$

Finestra 2

$F_o = 1$ $s = 0$ $F_a = 1$ $F_c = 0,80$ (valore convenzionale)

$g = 0,70$ (doppio vetro normale)

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 1 * 0,80 * 0,70 = 0,487$$

$$A_w = 1,33 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum 0,35 (A_w * \tau) = 0,35 (1,33 * 0,487) = 0,226 \text{ m}^2$$

ESPOSIZIONE A OVEST

Finestra 1

$F_o = 1$ $s = 0$ $F_a = 1$ $F_c = 0,80$ (valore convenzionale)

$g = 0,70$ (doppio vetro normale)

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 1 * 0,80 * 0,70 = 0,487$$

$$A_w = 1,08 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum 0,74 (A_w * \tau) = 0,74 (1,08 * 0,487) = 0,389 \text{ m}^2$$

Finestra 2

$F_o = 1$ $s = 0$ $F_a = 1$ $F_c = 0,80$ (valore convenzionale)

$g = 0,70$ (doppio vetro normale)

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 1 * 0,80 * 0,70 = 0,487$$

$$A_w = 2,85 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum 0,74 (A_w * \tau) = 0,74 (2,85 * 0,487) = 1,027 \text{ m}^2$$

Finestra 3

$F_o = 1$ $s = 0$ $F_a = 1$ $F_c = 0,80$ (valore convenzionale)

$g = 0,70$ (doppio vetro normale)

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 1 * 0,80 * 0,70 = 0,487$$

$$A_w = 0,925 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum 0,74 (A_w * \tau) = 0,74 (0,925 * 0,487) = 0,333 \text{ m}^2$$

Porta

$F_o = 1$ $s = 0$ $F_a = 1$ $F_c = 0,80$ (valore convenzionale)

$g = 0,70$ (doppio vetro normale)

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 1 * 0,80 * 0,70 = 0,487$$

$$A_w = 2,1 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum 0,74 * (A_w * \tau) = 0,74 * (2,1 * 0,487) = 0,757 \text{ m}^2$$

ESPOSIZIONE A EST

Finestra 1

$F_o = 1$ $s = 0$ $F_a = 0,83$ $F_c = 0,80$ (valore convenzionale)

$g = 0,70$ (doppio vetro normale)

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 0,83 * 0,80 * 0,70 = 0,404$$

$$A_w = 4,48 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum 0,74 (A_w * \tau) = 0,74 (4,48 * 0,404) = 1,34 \text{ m}^2$$

Finestra 2

$F_o = 1$ $s = 0$ $F_a = 1$ $F_c = 0,80$ (valore convenzionale)
 $g = 0,70$ (doppio vetro normale)

Con :

$$\tau = 0,87 * 1 * 1 * 0,80 * 0,70 = 0,487$$

$$A_w = 2,85 \text{ m}^2$$

$$A_{eq} = \sum 0,74 (A_w * \tau) = 0,74 (2,85 * 0,487) = 1,027 \text{ m}^2$$

Porta

$$A_{eq} = 0,757 \text{ m}^2$$

L'area equivalente totale è :

$$A_{eq \text{ tot.}} = A_{eq \text{ nord}} + A_{eq \text{ sud}} + A_{eq \text{ est}} + A_{eq \text{ ovest}} = \mathbf{22,535 \text{ m}^2}$$

Ora bisogna definire l'irradianza media stagionale I_m :

$$I_m = 11,57 * \frac{\sum nH}{\sum n}$$

n = numero di giorni del mese preso in considerazione

H = irradiazione solare globale giornaliera media mensile

$$I_m = \mathbf{95 \text{ W/m}^2} \quad (\text{per Roma, come dalla tabella dei dati climatici stagionali})$$

Ora con:

$$a = \text{apporto gratuito interno} = \frac{a_p}{h} = \frac{4}{2,80} = \mathbf{1,428 \text{ W/m}^3}$$

dove:

a_p = valore degli apporti gratuiti interni per unità di superficie di pavimento in W/m^2

h = altezza di piano dell'edificio in m

l'indice volumico degli apporti gratuiti sarà:

$$\Theta_e = \frac{A_{eq} * I_m + a}{V} = \mathbf{4,07 \text{ W/m}^3}$$

CALCOLO DELL'INDICE VOLUMICO DELLE DISPERSIONI E VERIFICA

$$\Theta_d = (C_d + 0,34 n) * (v_i - v_{em})$$

$$\Theta_d = (0,72 + 0,34 * 0,5) * (20 - 10,3) = \mathbf{8,633 \text{ W/m}^3}$$

$$\Theta_e / \Theta_d = 4,07 / 8,633 = \mathbf{0,47 < 0,6}$$

I calcoli che seguono sono stati effettuati utilizzando, come da normativa, parametri stagionali anziché mensili, con un rapporto $\Theta_e / \Theta_d < 0,6$.

Procediamo ora con il calcolo del FEN.

Si tratta di valutare, in primo luogo, il fabbisogno energetico convenzionale stagionale di energia primaria richiesto per il riscaldamento (in KJ) ovvero:

$$Q = \frac{(Q_p - Q_{po} * \eta_{po})}{\eta_{tu}} + \frac{(Q_{br} + Q_{po})}{\eta_{sen}}$$

dove Q_p è l'energia termica stagionale fornita dal sistema di produzione del calore, in Joule:

$$Q_p = \frac{86400 * N}{\eta_d} * \frac{[\sum V (C_{ge} F_{il} (v_i - v_{em})) - \eta_{ue} F_{ig} v_e]}{\eta_e \eta_c}$$

Procediamo anzitutto nel calcolare il C_{ge} , cioè il **coefficiente di dispersione energetico volumico globale**:

$$C_{ge} = \frac{H_t + H_v + H_g + H_{ie} + \sum (H_a v_i - v_{em})}{V}$$

con:

H_t = coefficiente di dispersione termica per trasmissione tra la zona considerata e l'esterno

$$H_t = \sum A * U + \sum \psi * l$$

A = area di ogni disperdente in m^2

U = trasmittanza termica di ogni disperdente in $W/m^2 K$

ψ = trasmittanza lineare termica di ogni ponte termico in $W/m K$

l = lunghezza del ponte termico in m

dati:

A_1 = superficie tot. disperdenti opachi esterni = $214,447 m^2$

A_2 = superficie tot. disperdenti trasparenti = $44,635 m^2$

$A_{tot.} = 214,447 + 44,635 = 259,0821 m^2$

$A_1 U_1 =$ dispersione tot. pareti opache = $214,447 * 0,469 = 100,584864 W/K$

$A_2 U_2 =$ dispersione tot. superfici vetrate = $44,635 * 0,469 = 20,935734 W/K$

ψl = dispersione lineare tot. dei ponti termici = $37,0489 W/K$

$H_t = 121,52 + 37,05 = 158,569 W/K$

H_v = coefficiente di dispersione termica per ventilazione

$$H_v = c_p * \rho * n * V$$

dati :

c_p = capacità termica massica a pressione costante dell'aria (1000 J/kg K = 0,277 Wh/kg K)

ρ = massa volumica dell'aria (1,2 kg / m³)

n = numero di ricambi d'aria per ventilazione e infiltrazione = 0,7 (categoria E.1, edificio di nuova costruzione)

V = volume interno della zona termica = 526 m³

H_v = 0,277 * 1,2 * 0,7 * 526 = 122,392 W/K

H_g = coefficiente di dispersione termica verso il terreno

H_g = (U₀ * A + ΔψP)

Con Δψ = 0 avremo Δψ P = 0

$$H_g = U * A = 58,253 \text{ W/K}$$

H_{ie} = coefficiente di dispersione termica verso zone non riscaldate (= 0 nel nostro caso)

H_{ia} = coefficiente di dispersione termica verso locali a temperatura prefissata (= 0 nel nostro caso) cioè Σ(H_a v_i - v_{em}) = 0

Quindi, il **coefficiente di dispersione energetico volumico globale** sarà:

$$C_{ge} = \frac{158,569 + 122,392 + 58,253}{526} = 0,645 \text{ W/m}^3 \text{ K}$$

η_{ue} = coefficiente di utilizzazione degli apporti gratuiti

$$\eta_{ue} = \frac{1 - \gamma^\tau}{1 - \gamma^{\tau+1}} \quad \text{quando } \gamma \neq 1$$

dati:

$$\gamma = \frac{\theta_e}{C_{ge} * (\theta_i - \theta_m)}$$

$$\tau = 0,8 + \frac{tc}{28} \quad \text{dove } tc, \text{ unico termine ancora non noto, vale: } C / (H * 3600)$$

nel quale:

H = somma di tutti i coefficienti di dispersione termica in W/K

$C = At * c * M =$ *capacità termica delle strutture, cioè la capacità dell'edificio di utilizzare gli apporti gratuiti di calore provenienti sia dall'esterno (sole) sia dall'interno (utenti, elettrodomestici, illuminazione, etc.)*

dove :

At = area totale dell'involucro che delimita la zona calcolata come somma delle superfici verticali più due volte l'area in pianta , per il numero dei piani della zona

c = capacità termica massima di riferimento pari a 1000 J / kg K

M = massa termica della struttura complessiva edilizia = 135 kg / m²

Calcolando il tutto avremo:

$$At = 1048,745 \text{ m}^2$$

$$C = 492,87 * 1000 * 135 = 141.580.548 \text{ J/K}$$

$$H = H_v + H_t + H_g = 217,694 \text{ W/K}$$

$$t_c = \frac{141.580.548}{217,694 * 3600} = 180,657$$

Quindi τ e γ saranno :

$$\tau = 0,8 + \frac{180,657}{28} = 7,252$$

$$\gamma = \frac{4,19}{0,645 * (20 - 10,3)} = 0,67 \quad \gamma \neq 1$$

$$\eta_{ue} = \frac{1 - 0,67^{\frac{7,252}{7,252 + 1}}}{1 - 0,67^{\frac{7,252}{7,252 + 1}}} = 0,981 \text{ (98\%)}$$

Fil = fattore di intermittenza = 1 - a (1 - fil)

a = parametro dipendente dal tipo di corpo scaldante

fil = termine che tiene conto della costante di tempo t_c , e dei due fattori:

n_{ag} = numero di ore di spegnimento dell'impianto nel periodo giornaliero compreso tra le ore 8:00 e le ore 16:00

n_{dg} = ore di attenuazione o spegnimento nello stesso periodo

$$\mathbf{fil} = \frac{[(0,3 t' - 1) * (\vartheta_i - \vartheta_{em})] - [(24,4 * t') * (1 + e^{\frac{(1,5 - 0,15 t_c)}{t_c}})] + 1,072}{1000}$$

dati:

$a = 1,00$ (per i termoconvettori)

$$t' = 1,05 n_{ag} + 0,9 n_{dg} = 11,70 \quad (\text{assunti } n_{ag} \text{ e } n_{dg} \text{ uguale a } 6)$$

$$t_c = 85$$

ϑ_i = media aritmetica della temperatura interna di progetto dei singoli ambienti = 20 °C)

ϑ_{em} = temperatura media stagionale dell'aria esterna = 10,3 °C

$$\mathbf{fil} = \frac{[(0,3 * 11,7 - 1) * (20 - 10,3)] - [(24,4 * 11,7) * (1 + e^{\frac{(-11,235)}{85}})] + 1072}{1000} = 0,81$$

Per cui sarà:

$$Fil = 1 - 1,00 * (1 - 0,81) = 0,81 = 81 \%$$

$$Fig = \text{fattore di attenuazione} = 1 - b (1 - fig)$$

b = parametro dipendente dal tipo di corpo scaldante = 1,00 (per i termoconvettori)

$$fig = \frac{[(nag + 0,2) * (\vartheta_1 - \vartheta_{em})] - (32,8 * t''') + 1.070 * (1 + e^{\frac{(0,2 - 0,16tc)}{1.000}})}{1.000}$$

con :

$$t''' = nag + 0,6 \text{ ndg} = 9,60$$

$$fig = \frac{[(6 + 0,2) * (20 - 10,3)] - (32,8 * 9,6) + 1070 * (1 + e^{\frac{(-1,917)}{1.000}})}{1.000} = \mathbf{0,815}$$

Quindi:

$$Fig = 1 - 1 (1 - 0,815) = 0,815 = 81,5 \%$$

Ora possiamo finalmente calcolare:

Qp = energia termica convenzionale stagionale fornita dal sistema di produzione del calore.

$$Qp = \frac{86400 * N}{\eta_d} * \left\{ \frac{\sum V [C_{ge} Fil (\vartheta_1 - \vartheta_{em})]}{\eta_e \eta_c} - \eta_{ue} Fig \theta_e \right\}$$

dove:

$$\eta_d = 0,95 \quad (\text{per categoria})$$

$$\eta_{ue} = 0,981 \quad (\text{per terminale di erogazione - corpo scaldante})$$

$$\eta_c = 0,94$$

$$\eta_e = 0,99 \quad (\text{per termoconvettori})$$

$$C_{ge} = 0,645 \text{ W/m}^3 \text{ K}$$

$$Qp = \frac{86400 * 166}{0,95} * \frac{526 * (0,645 * 0,81 * 9,7) - (0,981 * 0,815 * 5,225)}{0,99 * 0,94}$$

$$Qp = \mathbf{43.177.376.464,282 \text{ J}}$$

Ora possiamo calcolare anche **Q**:

$$Q = \frac{Qp - Q_{po} * \eta_{po}}{\eta_{tu}} + \frac{Q_{br} + Q_{po}}{\eta_{sen}}$$

dove :

Qpo = energia elettrica assorbita dalle pompe di circolazione (dato fornito dal produttore) = 30W = 30 * 86400 * 166 = **430.272.000 J**

ηpo = percentuale utile di energia elettrica assorbita dalle pompe e trasferita al fluido (fattore convenzionale = **0,85** cioè l'85%)

η_{tu} = rendimento termico utile stagionale medio del generatore = 1

η_{sen} = rendimento del sistema elettrico nazionale = 0,36 cioè il 36%

Q_{br} = energia elettrica assorbita dal bruciatore nel periodo di funzionamento = 0

Quindi:

$$Q = 44.006.845.264,282 \text{ J} = 44.006.845,264 \text{ KJ}$$

Di conseguenza, il valore del FEN di progetto:

$$\text{FEN}_{\text{prog}} = \frac{Q}{(\eta_{11} - \eta_{em}) * N * V} = \frac{44.006.845.264,282}{(20 - 10,3) * 166 * 526} = \underline{\underline{51958,268 \text{ J}}}$$

Questo valore del fabbisogno energetico normalizzato deve essere confrontato con il FEN limite imposto dal D.P.R. 412/1993 e determinato attraverso l'espressione:

$$\text{Fen}_{\text{lim}} = [(\text{Cd}_{\text{lim}} + 0,34 n) - \text{Ku} \left(\frac{0,01 * \text{Im}}{dT} + \frac{a}{dT} \right)] * \frac{86,4}{\eta_{g \text{ lim}}}$$

dati:

$$\text{Cd}_{\text{lim}} = 0,812 \text{ W/ m}^3\text{K}$$

$$a = 1,428 \text{ W/ m}^3$$

$$n = 0,7$$

$$\text{Im} = 95 \text{ W/ m}^2$$

$$dT = 9,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

η_g = rendimento globale medio definito dal D.P.R. 412 / 1993 dal seguente valore :

$$\eta_p * \eta_c * \eta_e * \eta_d$$

dove

η_p = rendimento di produzione medio stagionale dato dal rapporto fra l'energia termica utile generata e immessa nella rete di distribuzione (Q_p) e l'energia primaria delle fonti energetiche usate (Q)

$$\eta_d = 0,95$$

$$\eta_e = 0,99$$

$$\eta_c = 0,94$$

calcolando:

$$\eta_p = \frac{Q_p}{Q} = \frac{43.177.376.464,282 \text{ J}}{44.836.314.064,282 \text{ J}} = 0,963$$

$$\eta_g = 0,963 * 0,94 * 0,99 * 0,95 = \mathbf{0,85}$$

$$\eta_{g \text{ lim}} = 65 + 3 \log_{10} (\text{PN}) = 68,14\% = \mathbf{0,68} < \mathbf{0,85}$$

condizione verificata

con PN = potenza utile del generatore = 11,1 KW

Ku = coefficiente adimensionale di utilizzazione degli apporti gratuiti definibile in funzione della zona climatica e del rapporto S/V.

Con $S/V = 0,717 \text{ l/m}$

ho:

$$\mathbf{Ku} = 0,96 - \frac{0,17 * (0,9 - 0,717)}{0,9 - 0,2} = \mathbf{0,915}$$

Quindi:

FEN lim = 102,75 KJ

FEN prog = 52 KJ

FEN prog < FEN lim = 53 < 102,75 KJ

VERIFICATO

8. VERIFICA TERMOIGROMETRICA

TAMPONATURA ESTERNA

Utilizzando la trasmittanza totale ($U_{tot} = 0,469 \text{ W/m}^2\text{K}$) calcolata precedentemente, procediamo a calcolare la temperatura di ogni strato della nostra parete perimetrale esterna:

temperatura liminare interna

strato 1

$$T_{si} = T_i - U_{tot} * \frac{(T_i - T_e)}{1/r_{si}} = 20 - \frac{0,469 (20 - 0)}{7,69} = 18,78 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura dello strato di intonaco interno

strato 2

$$T_1 = T_i - U_{tot} * \frac{(T_i - T_e)}{1/(r_{si} + R_1)} = 20 - \frac{0,469 (20 - 0)}{6,94} = 18,649 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura dello strato in laterizio forato da cm 8

strato 3

$$T_2 = T_i - U_{tot} * \frac{(T_i - T_e)}{1/(r_{si} + R_1 + R_2)} = 20 - \frac{0,469 (20 - 0)}{2,907} = 16,773 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura dell'intercapedine (strato d'aria di 9 cm)

strato 4

$$T_3 = T_i - U_{tot} * \frac{(T_i - T_e)}{1/(r_{si} + R_1 + R_2 + R_3)} = 20 - \frac{0,469 (20 - 0)}{1,968} = 15,234 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura dello strato isolante (polistirene espanso estruso da 4 cm)

strato 5

$$T_4 = T_i - U_{tot} * \frac{(T_i - T_e)}{1/(r_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} = 20 - \frac{0,469 (20 - 0)}{0,67} = 6,013 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura dello strato di laterizio semipieno da 12 cm

strato 6

$$T_5 = T_i - U_{tot} * \frac{(T_i - T_e)}{1/(r_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5)} = 20 - \frac{0,469 (20 - 0)}{0,555} = 3,105 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura dello strato di intonaco esterno

strato 7

$$T_6 = T_i - U_{tot} * \frac{(T_i - T_e)}{1/(r_{si}+R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_6)} = 20 - \frac{0,469 (20 - 0)}{0,548} = 2,899 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura liminare esterna

strato 8

$$T_{se} = T_i - U_{tot} * \frac{(T_i - T_e)}{1/(r_{si}+R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_6+r_{se})} = 20 - \frac{0,469 (20 - 0)}{0,537} = 2,523 \text{ } ^\circ\text{C}$$

CALCOLO DELLE PRESSIONI

$$\text{Pressione di saturazione} = e^{\left[65,81 - \frac{7066,27}{T+273,15} - 5,976 \ln(T+273,15)\right]}$$

$$T_i = 20^\circ\text{C} \quad P_i = e^{\left[65,81 - \frac{7066,27}{20+273,15} - 5,976 \ln(20+273,15)\right]} = 2339,302 \text{ Pa}$$

$$T_{si} = 18,78 \text{ } ^\circ\text{C} \quad P_{si} = e^{\left[65,81 - \frac{7066,27}{18,78+273,15} - 5,976 \ln(18,78+273,15)\right]} = 2168,508 \text{ Pa}$$

$$T_1 = 18,649 \text{ } ^\circ\text{C} \quad P_1 = e^{\left[65,81 - \frac{7066,27}{18,649+273,15} - 5,976 \ln(18,649+273,15)\right]} = 2150,832 \text{ Pa}$$

$$T_2 = 16,773 \text{ } ^\circ\text{C} \quad P_2 = e^{\left[65,81 - \frac{7066,27}{16,773+273,15} - 5,976 \ln(16,773+273,15)\right]} = 1911,147 \text{ Pa}$$

$$T_3 = 15,234 \text{ } ^\circ\text{C} \quad P_3 = e^{\left[65,81 - \frac{7066,27}{15,234+273,15} - 5,976 \ln(15,234+273,15)\right]} = 1732,285 \text{ Pa}$$

$$T_4 = 6,013 \text{ } ^\circ\text{C} \quad P_4 = e^{\left[65,81 - \frac{7066,27}{6,013+273,15} - 5,976 \ln(6,013+273,15)\right]} = 936,4 \text{ Pa}$$

$$T_5 = 3,105 \text{ } ^\circ\text{C} \quad P_6 = e^{\left[65,81 - \frac{7066,27}{3,105+273,15} - 5,976 \ln(3,105+273,15)\right]} = 763,696 \text{ Pa}$$

$$T_6 = 2,899 \text{ } ^\circ\text{C} \quad P_7 = e^{\left[65,81 - \frac{7066,27}{2,899+273,15} - 5,976 \ln(2,899+273,15)\right]} = 752,605 \text{ Pa}$$

$$T_{se} = 2,523 \text{ } ^\circ\text{C} \quad P_{se} = e^{\left[65,81 - \frac{7066,27}{2,523+273,15} - 5,976 \ln(2,523+273,15)\right]} = 732,726 \text{ Pa}$$

$$T_e = 0^\circ\text{C} \quad P_e = e^{\left[65,81 - \frac{7066,27}{273,15} - 5,976 \ln(273,15)\right]} = 610,913 \text{ Pa}$$

Pressione parziale del vapore nell'ambiente interno

$$P_{vi} = \frac{P_i * U_{ri}}{100}$$

P_i : pressione di saturazione corrispondente alla temperatura interna *T_i*

U_{ri} : umidità relativa interna (40 %)

$$P_{vi} = \frac{2339,302 * 40}{100} = 935,72 \text{ Pa}$$

Pressione parziale del vapore nell'ambiente esterno

$$P_{ve} = \frac{P_{se} * U_{re}}{100}$$

P_{se} : pressione di saturazione corrispondente alla temperatura esterna *T_{se}*

U_{re} : umidità relativa esterna (60 %)

$$P_{ve} = \frac{541,3 * 60}{100} = 324,78 \text{ Pa}$$

Ora serve definire: $z = S / \delta_a$ dove δ_a è la permeabilità a secco del materiale ad un intervallo di umidità relativa compreso tra 0% e 50%:

	S	δ_a	z
intonaco interno	0,01	18	0,00055
laterizio forato	0,08	20,57	0,00389
intercapedine	0,09	193	0,000466
lastra di polistirene	0,04	2,08	0,0192
laterizio semipieno	0,12	20,57	0,00583
intonaco esterno	0,02	8,5	0,00235

$$\Sigma z: 0,0323 \text{ m} / [\text{Kg/ms Pa}] = \text{m}^2 \text{s Pa} / \text{Kg}$$

Valori di pressione parziale nella parete :

$$P_v = P_1 - \frac{1}{\sum \frac{s}{\delta}} * (P_{vi} - P_{ve}) * \left(\frac{S_1}{\delta} + \frac{S_2}{\delta} + \frac{S_n}{\delta} \right)$$

Pv1 = 927,87 Pa

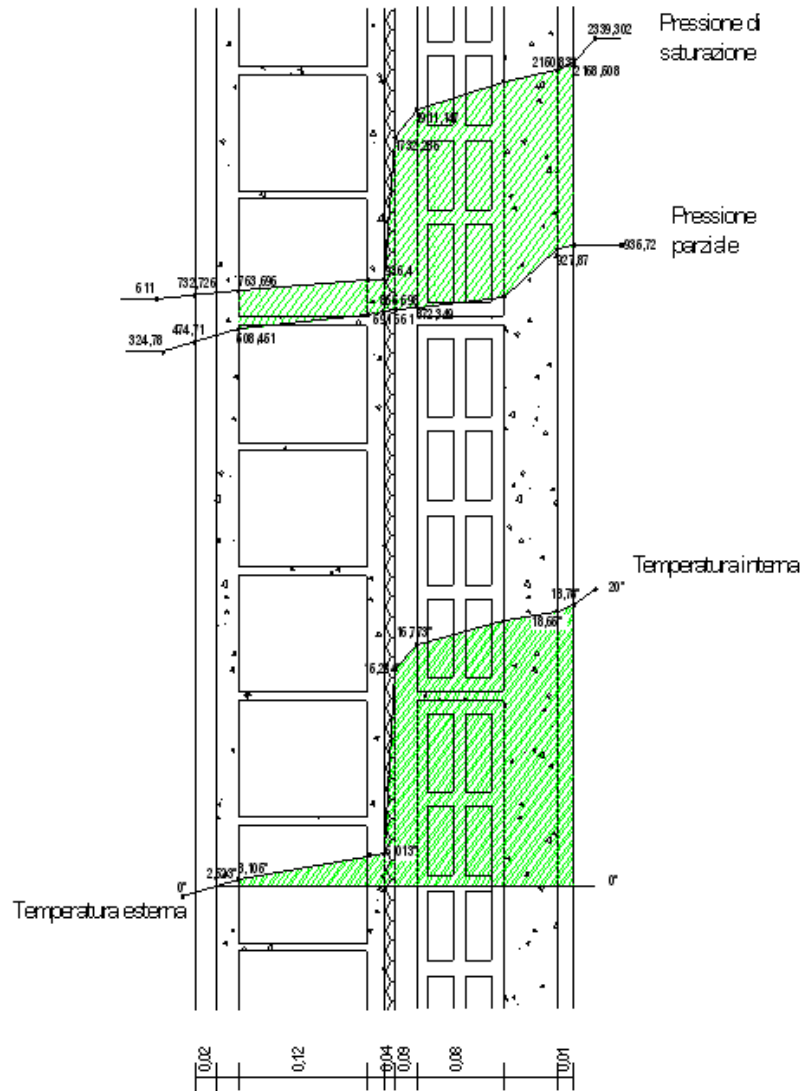
Pv2 = 872,349 Pa

Pv3 = 865,698 Pa

Pv4 = 591,661 Pa

Pv5 = 508,451 Pa

Pv6 = 474,71 Pa



9. RITARDO DI FASE E SMORZAMENTO TERMICO DELLA MURATURA

L'equazione che definisce l'oscillazione della temperatura nella posizione $x = 0$ è :

$$T = T_0 + \theta_0 \sin(\omega t) \quad \text{dove } \theta_0 \text{ è l'escursione termica massima.}$$

Invece, ad una data distanza x dal primo strato, il valore della temperatura avrà l'espressione

$$T_x = T_0 + \theta_0 * (1/e^{\beta x}) * \sin(\omega t - \beta x)$$

dove:

$$\beta = \sqrt{\omega/2\alpha} = \text{fattore di attenuazione termica}$$

$$\omega = 2\pi/t_p \quad (t_p \text{ è il periodo dell'oscillazione di temperatura uguale a 24h)}$$

$$\alpha = \text{diffusività termica che dipende dalle caratteristiche della parete} = \lambda / (\delta * c)$$

$$\lambda = \text{coefficiente di conduttività termica del materiale}$$

$$\delta = \text{densità del materiale}$$

$$c = \text{calore specifico del materiale}$$

Per trovare il ritardo di fase e lo smorzamento dovuti ad una parete non omogenea, si utilizzano le **formule di Mackey e Wright** :

$$\text{ritardo di fase} \quad \varphi = 1/2 * \sqrt{t_p A^2 B / \pi}$$

$$\text{smorzamento} \quad \theta = \theta_0 * \sigma$$

PARETE OPACA VERSO L'ESTERNO: SPESSORE 0,36 m

Ordine degli strati	Materiale	Spessore S (m)	Conduttività termica λ (W/mK)	Conduttanza C (W/m ² K)	Resistenza R (m ² K/W)
	Adduttanza interna			7,7	0,13
1	Intonaco interno	0,01	0,774	77,52	0,013
2	Mattone forato	0,08	0,43	5,38	0,186
3	Intercapedine aria	0,09	0,42	4,666	0,214
4	Lastra polistirene	0,04	0,03	0,75	1,333
5	Mattone semipieno	0,12	0,618	5,15	0,194
6	Intonaco esterno	0,02	0,89	44,45	0,0225
	Adduttanza esterna			25	0,04
				Trasmittanza = K = 1/R = 0,469 W/m²K	2,132

Ordine degli strati	Materiale	Spessore S (m)	Conducibilità λ (W/mK)	Densità δ (Kg/m ³)	Calore specifico c (Kcal/kg K)	Resistenza R $R = 1/C = S/\lambda$ (m ² K/W)	$S*\delta*c$ (Kcal/m ² K)
1	Intonaco interno	0,01	0,774	1400	0,19	0,013	2,66
2	Mattone forato	0,08	0,43	1400	0,18	0,186	20,16
3	Intercapedine aria	0,09	0,42	1	0,24	0,214	0,0216
4	Lastra polistirene	0,04	0,03	30	0,29	1,333	0,348
5	Mattone semipieno	0,12	0,618	1800	0,22	0,194	47,52
6	Intonaco esterno	0,02	0,89	1600	0,19	0,0225	6,08
						A = $\sum R = 1,962$	

$$A = 1,962 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$B = (1,1/A) * (S_i \delta_i c_i + S_1 \delta_1 c_1 + S_2 \delta_2 c_2 + \dots S_n \delta_n c_n) + (\lambda_e \delta_e c_e)/A * [S_e/\lambda_e - 0,1 (S_i/\lambda_i) - 0,1 (S_1/\lambda_1) - \dots - 0,1 (S_n/\lambda_n)]$$

$$B = 1,1 / 1,962 * (2,66 + 20,16 + 0,0216 + 0,348 + 47,52 + 6,08) + [(0,89) (1600) (0,19/1,962)] * [(0,02/0,89) - 0,1(0,01/0,774) - 0,1(0,08/0,43) - 0,1(0,09/0,42) - 0,1(0,04/0,03) - 0,1(0,12/0,618)] = 19,35 \text{ [W/m}^2\text{K]}^2$$

$$\text{Smorzamento } \theta = \theta_0 * \sigma$$

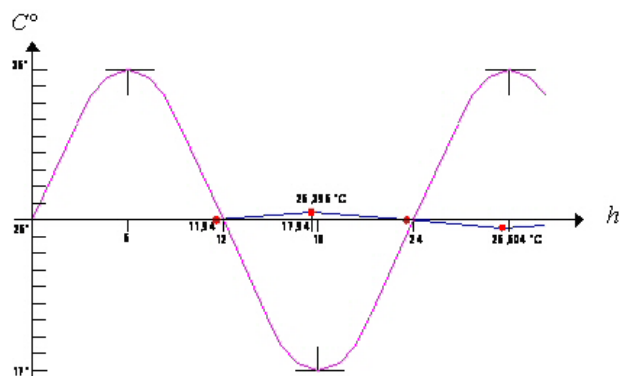
Con:

$$\sigma = 1 / e^{\sqrt{\pi A^2 B / t_p}}$$

$$\sigma = 1 / e^{\sqrt{3,14 * 1,963^2 * 19,35 / 24}} = 0,044$$

e assumendo $\theta_0 = 9 \text{ }^\circ\text{C}$ si ha:

$$\theta = 9 * 0,044 = 0,396 \text{ }^\circ\text{C}$$



$$\text{Ritardo di fase } \varphi = \frac{1}{2} * \sqrt{t_p A^2 B / \pi}$$

$$\varphi = \frac{1}{2} * \sqrt{24 * 1,963^2 * (19,35 / 3,14)} = 11,94 \text{ h}$$

— x = 0 (esterno a regime estivo)

— x = 0,36m (interno non climatizzato)

CARTA DEL SOLE

Latitudine $41^{\circ} 53'$

Longitudine $12^{\circ} 28'$

A 21 GIUGNO

B 21 LUGLIO

C 21 AGOSTO

D 21 SET-MAR

E 21 OTT-FEB

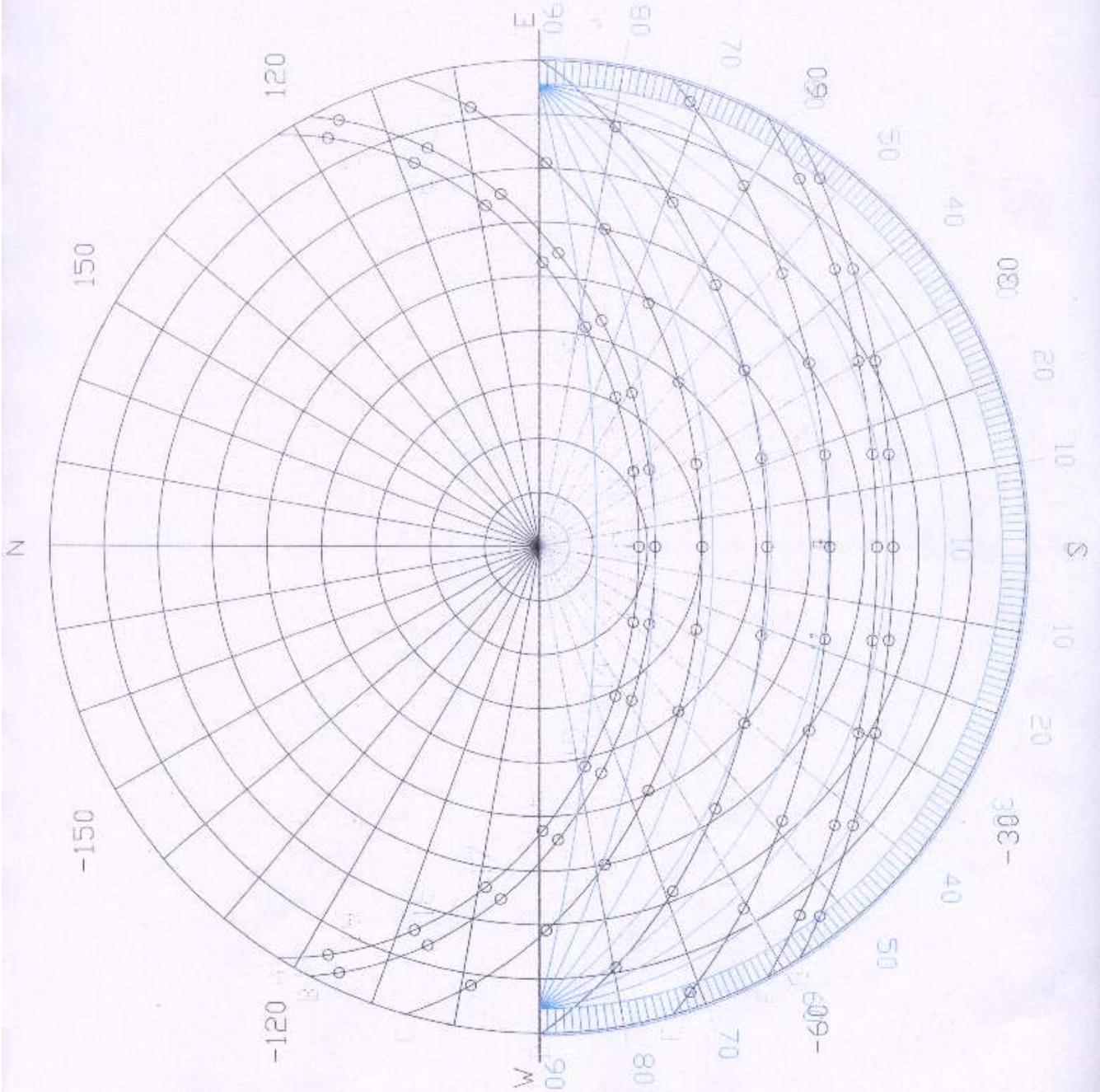
F 21 NOV-GEN

G 21 DICEMBRE

linea di base (facciata)

Oggetto : facciata Sud dell'edificio

Località : Roma



CARTA DEL SOLE

Latitudine $41^{\circ} 53'$

Longitudine $12^{\circ} 28'$

A 21 GIUGNO

B 21 LUGLIO

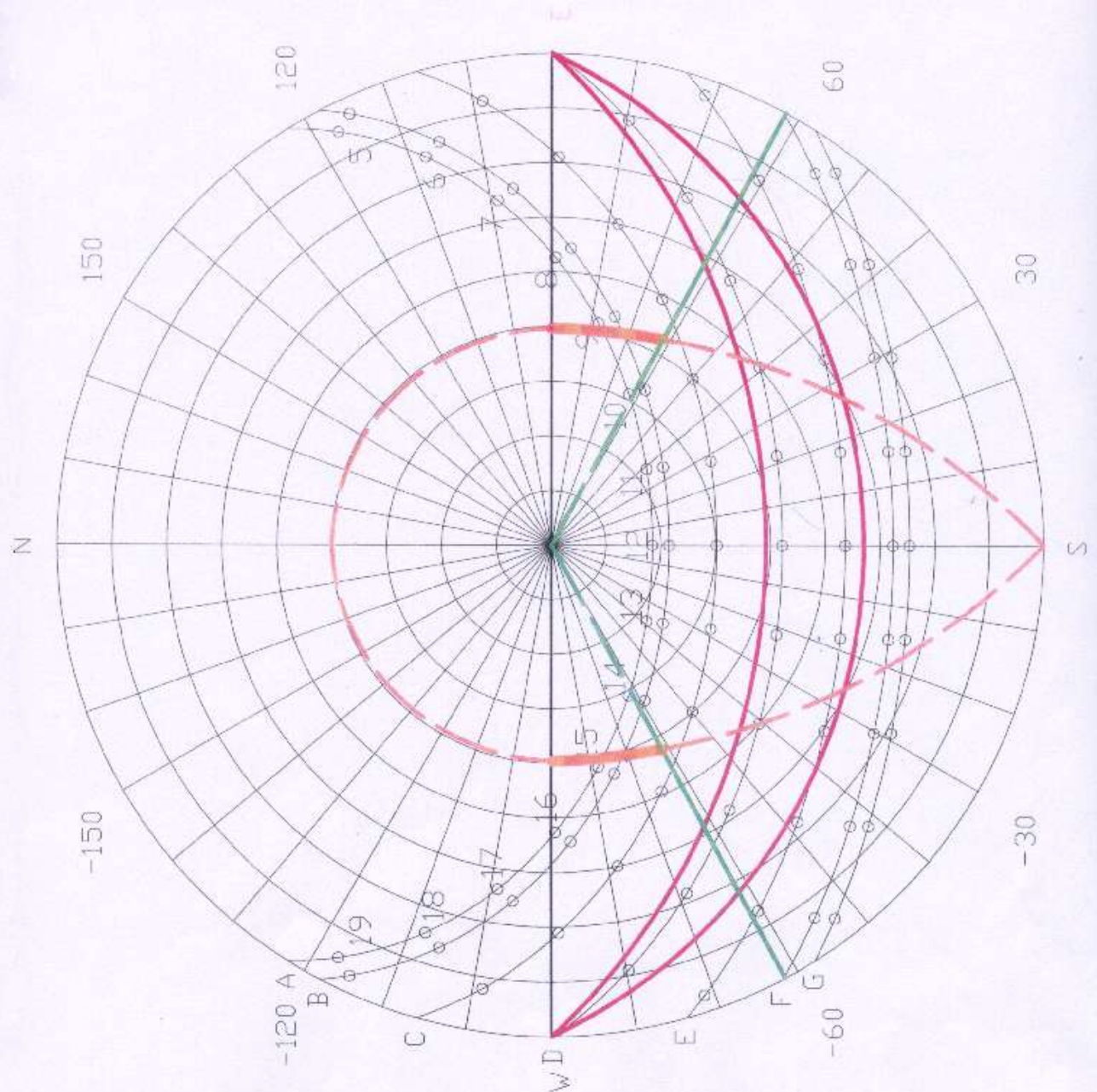
C 21 AGOSTO

D 21 SET-MAR

E 21 OTT-FEB

F 21 NOV-GEN

G 21 DICEMBRE



curve d'ombra relative al balcone, rispettivamente a 33° e 55°

angoli d'ombra a 28° misurati in alzato, relativi ai muri laterali

curva d'ombra a 47° misurata in pianta, relativa ai muri laterali

linea di base (facciata)

Oggetto : facciata Sud vetrata del soggiorno-pranzo, con protezione solare costituita dal balcone sovrastante e da muri laterali.

Località : Roma

DIAGRAMMI DI MASCHERAMENTO

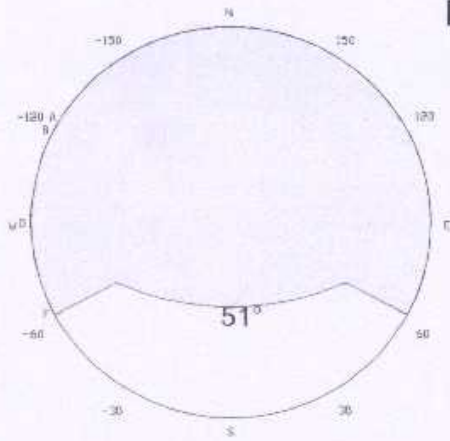


Fig.4

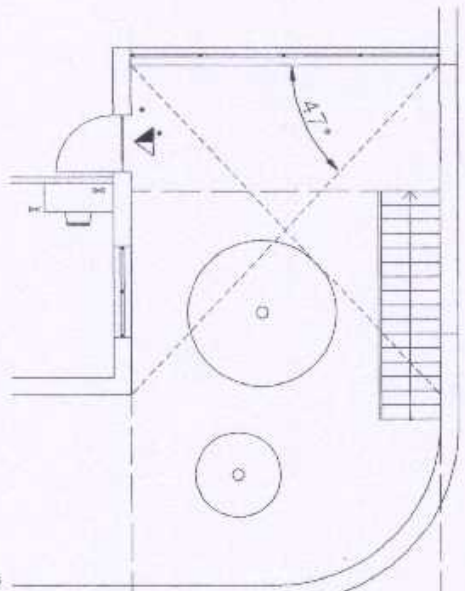
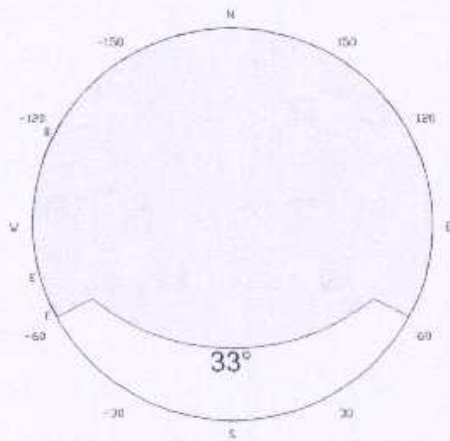


Fig.2

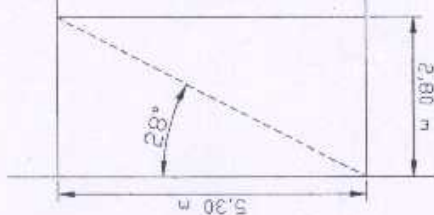


Fig.3

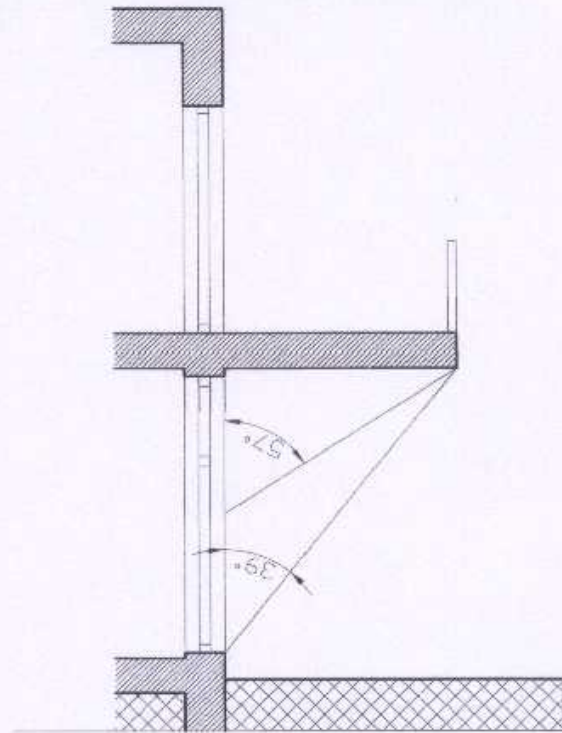


Fig.1

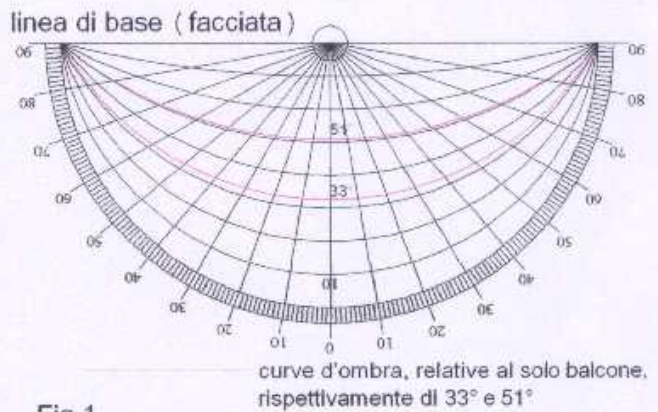


Fig.1

Dal balcone del primo piano sono proiettati angoli d'ombra, rispetto alla verticale, di 57° e 39° (i cui complementari a terra sono rispettivamente di 33° e 51°). Per costruire le curve d'ombra è stato utilizzato il goniometro solare (in basso) collocato a Sud sulla carta del sole

Fig.2

Misura, in pianta, degli angoli tra la facciata vetrata del soggiorno-pranzo e i muri verticali laterali

Fig.3

Misura, in alzato, dell'angolo tra la larghezza della facciata vetrata del soggiorno-pranzo e i muri verticali laterali

Fig.4

Diagrammi di mascheramento finali