Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria

Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Comportamento termico dinamico di strutture opache

Relatore: Chiar.mo Prof. Costanzo Di Perna

Candidato: Luca Bonifazi

Anno accademico [2018-2019]

Sommario

1.Premessa 1

2.Obiettivo 4

3.Fenomeno analizzato 5

3.1 Temperatura periodica cosinusoidale……..……6

3.2 Temperatura interna di 80°C per 3 ore……7

4.Casi di studio 8

4.1 Parete D 8

4.2 Parete I 9

4.3 Parete EI 10

4.4 Parete E 11

4.5 Parete M 12

5. Metodi di calcolo dinamico del camportamento termico di strutture opache 14

5.1 Metodo analitico UNI EN ISO 13786 16

5.2 Metodi numerici- Il metodo alle differenze finite 22

5.2.1 Metodo esplicito o all'avanti 23

5.2.2 Metodo implicito o all'indietro 27

5.3 UNI EN ISO 52016 28

5.3.1 Modello di calcolo secondo EN ISO 52016 Par. 6.5 e applicazione ai casi di studio …….....29

5.3.2 Modello di calcolo secondo UNI EN ISO 52016 Appendice Nazionale e applicazione ai casi di studio…… 38

5.4 Simulazione tramite software-Ansys fluent 46

5.4.1 Modello Geometrico…….....47

5.4.2 Discretizzazione del modello:Meshing…….....48

5.4.3 Condizioni al contorno-Setup…….....49

5.4.4 Settaggio della soluzione e run della simulazione……..51

6. Risultati ottenuti sugli elementi opachi con I vari metodi utilizzati…….....52

6.1 Risultati con temperatura periodica cosinusoidale……..……52

6.2 Risultati con temperatura ambiente interna di 80°C per una durata di 3 ore…….….64

7. Conclusioni……..……..…...…….71

Bibliografia e sitografia

1.Premessa

L'edificio è un sistema termodinamico che ha per confine l'involucro edilizio,in grado di controllare le condizioni del sistema rappresentate dal comfort.Gli edifici sono continuamente soggetti a fluttuazioni,generalmente con periodicità giornaliera, a causa delle variazioni periodiche delle condizioni climatiche esterne e delle condizioni di utilizzo.

Per valurare gli effetti prodotti dal regime dinamico sull'edificio occorre considerare gli effetti dello stoccaggio di energia. Tecnicamente un elemento opaco riesce a sfasare ed attanuare,in modo più o meno accentuato ,dipendente dalle proprie caratteristiche termofisiche,le variazioni di temperatura esterna:questo comportamento è noto con il termine di inerzia termica.
L'inerzia termica è legata al fenomeno conduttivo ed è capace di :

- mitigare le oscillazioni di temperatura nell'ambiente;
- realizzare migliori condizioni di benessere;
- limitare i costi di installazione di gestione degli impianti.

Infatti il valore massimo della potenza termica richiesta per la climatizzazione estiva può essere ridotto sfasando in modo adeguato gli istanti in cui il carico termico per ventilazione e quello per trasmissione raggiungono i rispettivi picchi giornalieri. E' possibile così evitare che all'interno accada quanto avviene all'esterno,ossia la presenza,quasi contemporanea, della massima insolazione e del valore più alto della temperatura dell'aria.

L'inerzia termica di una parete si manifesta con :

- uno **smorzamento** dell'ampiezza dell'onda,che comporta una riduzione della temperatura indoor nel periodo;
- uno **sfasamento** tra l'onda esterna e quella interna (capacità di una parete di far sentire più tardi gli effetti termici che si hanno all'esterno).

Dunque in un clima mediterraneo tipicamente caratterizzato da un'elevata radiazione solare diurna,la prestazione ottimale è quella che favorisce il comfort termico permettendo un accumulo durante le ore di maggiore incidenza solare,tipicamente quelle diurne e quindi caratterizzate da una maggiore temperatura superficiale esterna dell'elemento opaco ed una successiva cessione di calore nelle ore

notturne, quando questo può essere smaltito con un ricambio di aria più fresca proveniente dall'esterno.

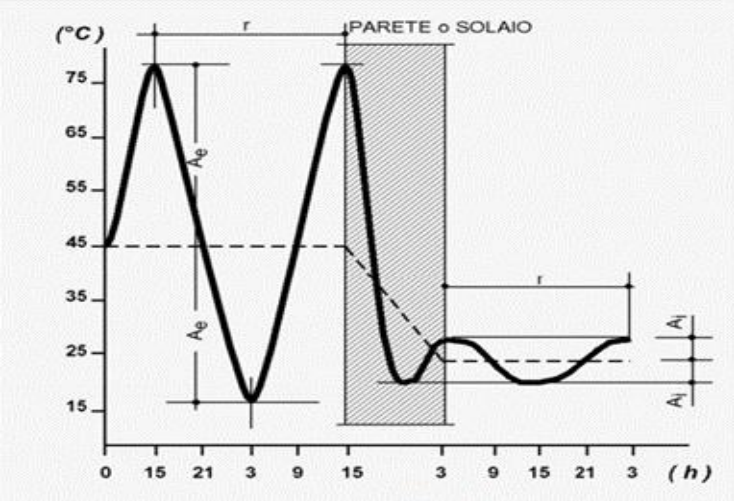

Figura 1:Fenomeno di sfasamento e attenuazione dell'onda termica in funzione del tempo

I valori di riferimento dei suddetti indicatori delle prestazioni termiche per una parete perimetrale,possono esssere individuati nella Prassi di Riferimento UNI/PdR 13:2015 "Sostenibilità ambientale nelle costruzioni- Strumenti operativi per la valutazione della sostenibilità",realizzata nell'ambito di uno specifico tavolo tecnico ITACA-UNI e pubblicata da UNI nel 30 Gennaio 2015,e che sostituisce il Protocollo ITACA Residenziale 2011. Da tale documento si evince la richiesta di uno sfasamento almeno pari a 12-13 ore affinchè il comportamento possa essere considerato ottimale, il che implica fisicamente che il calore entri nell'ambiente nelle ore notturne, quando può essere smaltito più facilmente.

Prestazioni quantitativa	Punteggio
Sfasamento 6 ore, attenuazione 0,60	-2
Sfasamento 7 ore, attenuazione 0,48	-1
Sfasamento 8 ore, attenuazione 0,40	0
Sfasamento 9 ore, attenuazione 0,35	1
Sfasamento 10 ore, attenuazione 0,30	2
Sfasamento 11 ore, attenuazione 0,20	3
Sfasamento 12 ore, attenuazione 0,15	4
Sfasamento 14 ore, attenuazione 0,12	5

Tabella 1:Protocollo Itaca, indicatori di prestazione, sfasamento attenuazione, per la verifica delle condizioni di comfort termico negli ambienti interni in estate

La valutazione del comportamento termico estivo di un edificio, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione e di contenere la temperature interna degli ambienti, necessita del calcolo delle proprietà termiche dinamiche, cioè quelle in regime non stazionario, tra cui la trasmittanza termica periodica.

Nel DPR 2 Aprile 2009 n° 59,all'articolo2, questa è definita come " Il parametro che valuta la capacità di una parete opaca di sfasare ed attenuare il flusso termico che la attraversa nell'arco delle 24 ore" ed i suoi valori possono essere individuati nell'articolo 4,comma 18,in cui si richiede che il progettista:

"esegue, in tutte le zone climatiche ad esclusione della F, per le località nelle quali il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva, sia maggiore o uguale a 290 W/m²:

- relativamente a tutte le pareti verticali opache con l'eccezione di quelle comprese nel quadrante nord-ovest / nord / nord-est, almeno una delle seguenti verifiche:
    - che il valore della massa superficiale Ms, di cui al comma 22 dell'allegato A, sia superiore a 230 kg/m²;
    - che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica (Y_{ie}), di cui al comma 4, dell'articolo 2, sia inferiore a 0,12 W/m² K;
- relativamente a tutte le pareti opache orizzontali ed inclinate che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica Y_{IE}, di cui al comma 4, dell'articolo 2, sia inferiore a 0,20 W/m² K".

2.Obiettivo

Da quanto affermato precedentemente scaturisce la necessità di possedere dei mezzi di calcolo o simulazione del comportamento termico di un elemento opaco in regime dinamico quanto più efficace ed efficienti.A tale scopo le normative internazionali ,europee e nazionali hanno cercato di definire dei metodi che permettessero di studiare tale fenomeno anche in modo semplificato ma quanto più realistico possibile.

Ne sono risultate diverse soluzioni:alcune tendono a discretizzare l'elemento in esame attraverso un numero fissato di nodi ,ai quali associare le caratteristiche termo-fisiche reali,altre,invece,giungono alla soluzione del problema analiticamente,ma limitatamente ai casi con condizioni al contorno di tipo armonico,perciò non utilizzabile per tutti i casi di studio.

Alla luce di ciò il presente lavoro si pone come obiettivo la valutazione dell'accuratezza dei risultati derivanti dall'applicazione di metodi semplificati, definiti nella norma UNI EN ISO 52016, confrontandoli con le soluzioni analitiche e i risultati forniti dal software Ansys Fluent, di consolidata e comprovata affidabilità.

Dimostrando la possibilità di poter utilizzare i suddetti metodi semplificati nella progettazione, la scelta di un elemento opaco in funzione del comportamento termico dinamico sarebbe resa più semplice e rapida rispetto a soluzioni più complicate che si avvalgono di software onerosi.

Lo scenario in cui sono state condotte tali valutazioni consiste in un singolo elemento opaco soggetto a delle sollecitazioni termiche che variano di intensità col passare del tempo:nel primo caso la forzante è di tipo armonico con ampiezza di 10°C,nel secondo la forzante è a carattere impulsivo con ΔT di 80°C.

3. Fenomeno analizzato

Le valutazioni sono state condotte applicando agli elementi opachi sollecitazioni termiche variabili nel tempo,sia sul lato interno che quello esterno: quindi le condizioni al contorno riguardano soltanto la temperatura ambiente interna ed esterna.

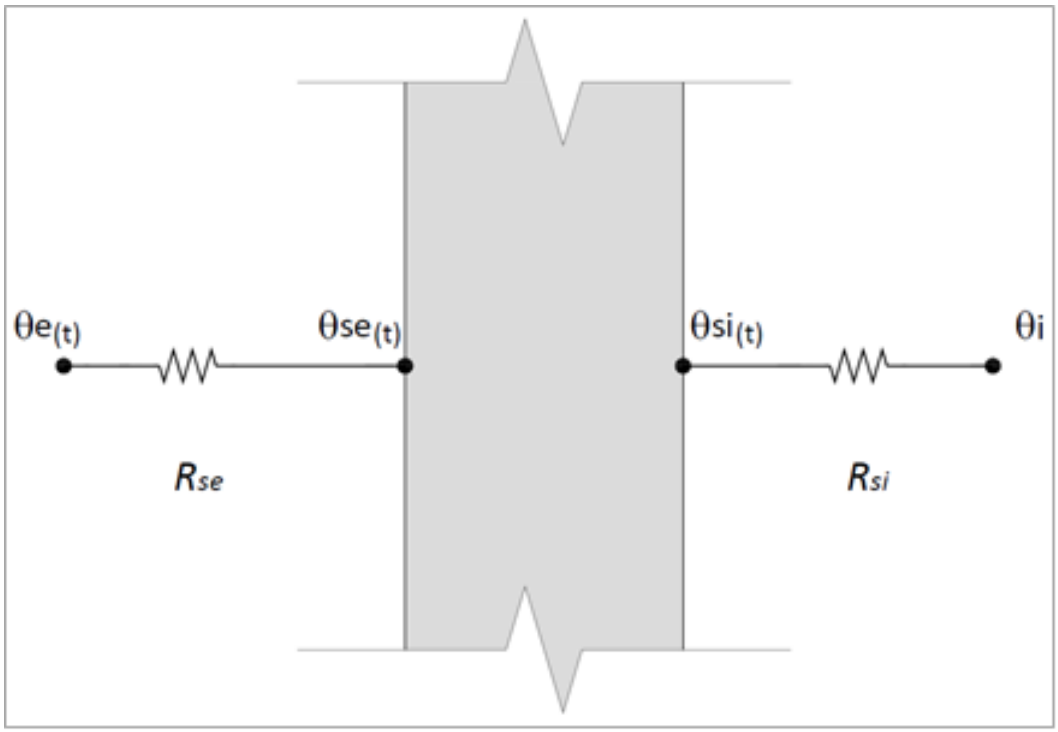

Figura 2: Schema del fenomeno di trasmissione del calore analizzato

$\theta_e(t)$ Temperatura ambiente esterna [°C];

$\theta_{se}(t)$ Temperatura superficiale parete lato esterno [°C];

$\theta_{si}(t)$ Temperatura superficiale parete lato interno [°C];

θ_i Temperatura ambiente interna costante [°C];

R_{se} Resistenza termica superficiale esterna;

R_{si} Resistenza termica superficiale interna;

Al fine di poter confrontare l'accuratezza dei metodi di analisi utilizzati,è stato considerato uno scenario semplificato facilmente gestibile a livello di calcolo:i fenomeni coinvolti sono quelli della conduzione monodimensionale(nello spessore dell'elemento opaco) e della convezione con l'aria esterna ed interna,entrambi in regime dinamico.

3.1 Temperatura periodica cosinusoidale

Nel primo caso, la forzante esterna è stata considerata pari ad una funzione periodica cosinusoidale oscillante attorno al valore 0 e con periodo pari a 24 h:

$$\theta_e(t) = \bar{\theta}_e + \left|\hat{\theta}_e\right| \cdot \cos(\omega(t + \psi))$$

$\theta_e(t)$ Temperatura esterna lato "n" [°C];

$\bar{\theta}_e$ Temperatura media esterna lato "n" [°C];

$|\hat{\theta}_e|$ Ampiezza della variazione di temperatura esterna lato "n" [°C];

ω Frequenza angolare della variazione termica [rad/s] =2π/T;

T Periodo considerato [s];

Ψ Fase iniziale [s]

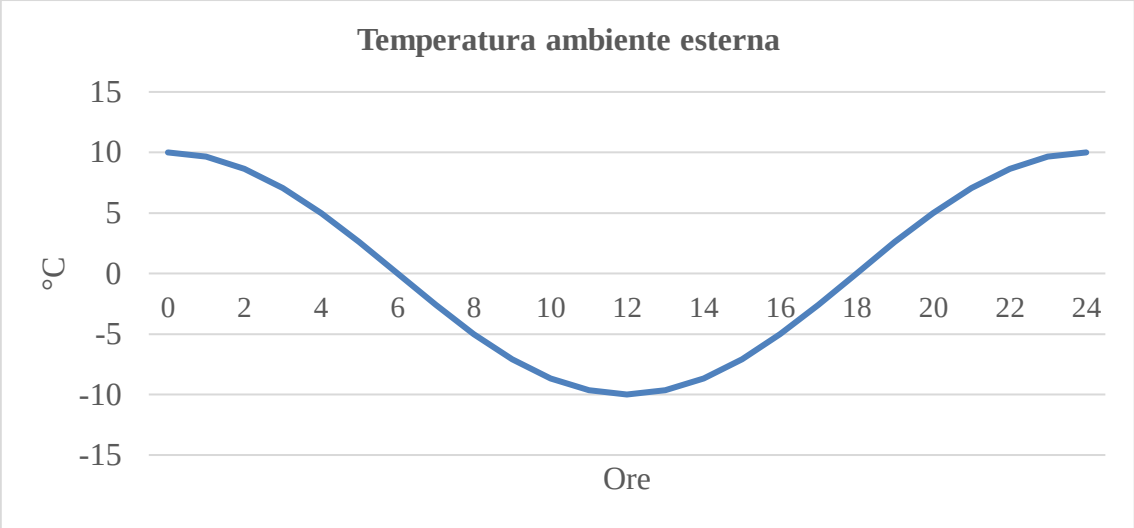

Figure 3: Andamento temperatura ambiente esterna

Ore	θ_e	Ore	θ_e
0	10,0000	**13**	-9,6593
1	9,6593	**14**	-8,6603
2	8,6603	**15**	-7,0711
3	7,0711	**16**	-5,0000
4	5,0000	**17**	-2,5882
5	2,5882	**18**	0,0000
6	0,0000	**19**	2,5882
7	-2,5882	**20**	5,0000
8	-5,0000	**21**	7,0711
9	-7,0711	**22**	8,6603
10	-8,6603	**23**	9,6593
11	-9,6593	**24**	10,0000
12	-10,0000		

Tabella 2: Valori di temperatura esterna assunti al variare delle ore

3.2 Temperatura interna costante di 80°C per 3 ore

Nel secondo caso come condizione al contorno si è scelto di mantenere costante la temperatura ambiente esterna (0°C) e considerare una temperatura interna con andamento descritto dal seguente grafico:

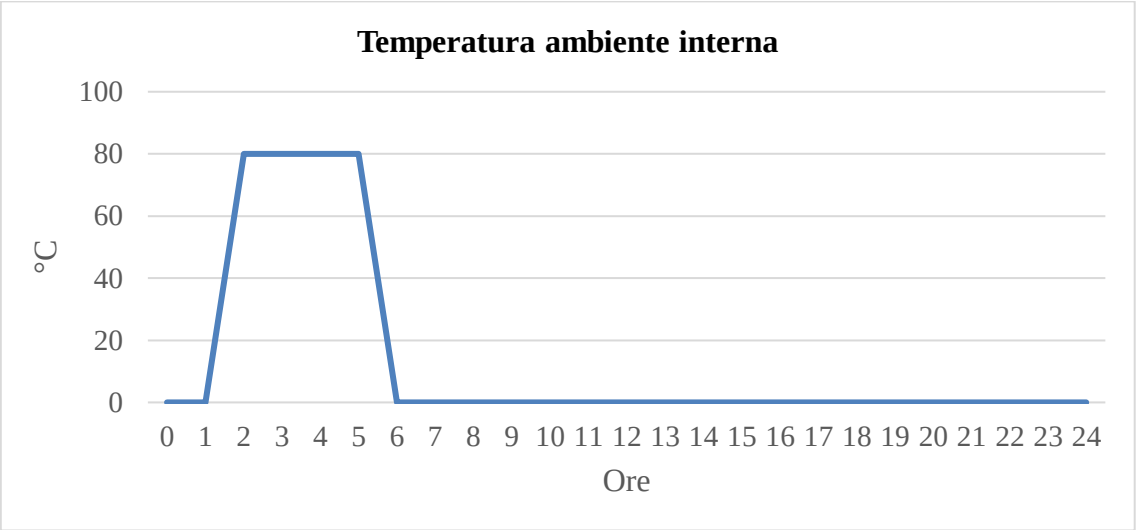

Figura 4 : Andamento temperatura ambiente interna

La scelta di questo profilo di temperatura è riconducibile agli effetti che si avrebbero nel caso di raggi solari incidenti sulla superficie interna delle pareti.

4. Casi di studio

Al fine di ottenere l'obiettivo prefissato sono stati esaminati diversi casi, ognuno caratterizzato da una stratigrafia differente: nello specifico sono state analizzate 5 pareti, di diversa stratigrafia e spessore dove la posizione dell'isolante varia ogni volta ad eccezione della parete D, che ne è priva. La necessità di indagare un numero di casi elevato nasce dalla volontà di raccogliere maggiori informazioni sul fenomeno in oggetto, al fine di individuare possibili risultati anomali in funzione del tipo di stratigrafia e posizione dell'isolamento.

Nel seguito si riporta in maniera dettagliata la composizione di ogni elemento opaco analizzato e le relative caratteristiche termofisiche, evidenziandone anche le proprietà termiche in regime stazionario.

4.1 Parete D

Si tratta di una parete in calcestruzzo priva di isolamento.

Descrizione degli strati	**Spessore (d)** [m]	**Conduttività termica (l)** [W/mK]	**Calore specifico (c)** [J/kgK]	**Densità (ρ)** [kg/ m^3]	**Resistenza termica (Rt)** [m^2K/W]
Aria esterna					0,040
Calcestruzzo	0,21	1,6	1000	2300	0,131
Aria interna					0,130

Spessore tot [m]	0,21
Rtot [m^2K/W]	0,301
U [W/m^2K]	3,321

Tabella 3: Caratteristiche termofisiche parete D

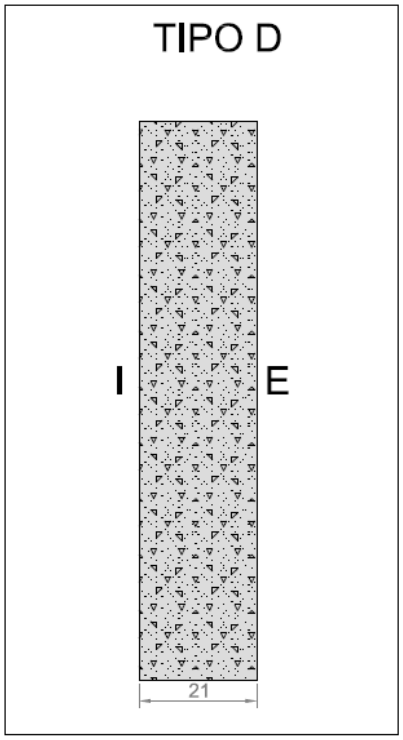

Figura 5: Sezione parete D

4.2 Parete I

Si tratta di una parete dotata di isolamento a cappotto esterno, stratigrafia comune in ambito edilizio.

Descrizione degli strati	**Spessore (d)** [m]	**Conduttività termica (l)** [W/mK]	**Calore specifico (c)** [J/kgK]	**Densità (ρ)** [kg/ m^3]	**Resistenza termica (Rt)** [m^2K/W]
Aria esterna					0,040
Intonaco esterno	0,010	0,530	1000	1500	0,019
Isolante	0,06	0,036	1450	20	1,667
Muratura poroton	0,35	0,180	1000	750	1,994
Intonaco interno	0,015	0,530	1000	1500	0,028
Aria interna					0,130

Spessore tot [m]	0,435
Rtot [m^2K/W]	3,828
U [W/m^2K]	0,261

Tabella 4 : Caratteristiche termofisiche parete I

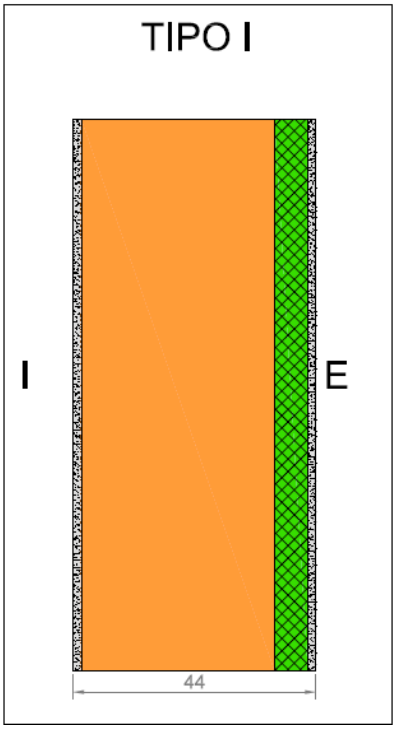

Figura 6: Sezione parete I

4.3 Parete EI

Si tratta di una parete dotata di isolamento in intercapedine.

Descrizione degli strati	**Spessore (d)** [m]	**Conduttività termica (l)** [W/mK]	**Calore specifico (c)** [J/kgK]	**Densità (ρ)** [kg/ m^3]	**Resistenza termica (R_t)** [m^2K/W]
Aria esterna					0,040
Intonaco esterno	0,015	0,530	1000	1500	0,028
tramezzo	0,120	0,200	1000	750	0,600
isolante	0,060	0,031	1450	20	1,935
tramezzo	0,120	0,200	1000	750	0,600
Intonaco interno	0,015	0,530	1000	1500	0,028
Aria interna					0,130

Spessore tot [m]	0,330
Rtot [m^2K/W]	3,362
U [W/m^2K]	0,297

Tabella 5: Caratteristiche termofisiche parete EI

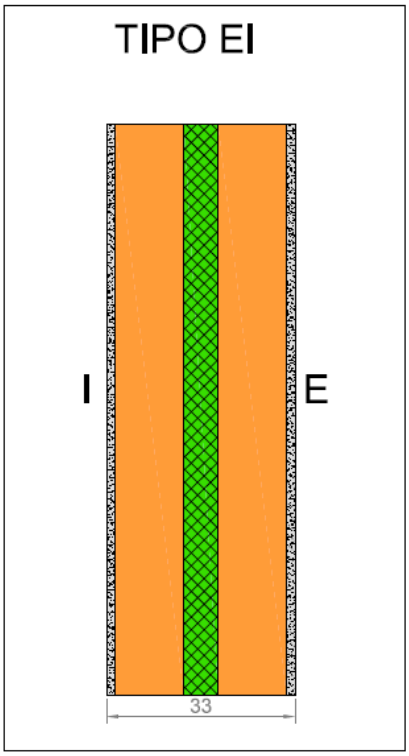

Figura 7: Sezione parete EI

4.4 Parete E

Si tratta di una parete dotata di isolamento a cappotto interno.

Descrizione degli strati	**Spessore (d)** [m]	**Conduttività termica (l)** [W/mK]	**Calore specifico (c)** [J/kgK]	**Densità (ρ)** [kg/ m^3]	**Resistenza termica (Rt)** [m^2K/W]
Aria esterna					0,040
Intonaco	0,0150	0,530	1000	1500	0,060
Muratura	0,3000	0,180	1000	750	1,667
Intonaco	0,0150	0,530	1000	1500	0,028
Isolante	0,0600	0,036	1450	20	1,667
Cartongesso	0,0125	0,210	1000	700	0,028
Aria interna					0,130

Spessore tot	0,4025
Rtot [m^2K/W]	3,619
U [W/m^2K]	0,276

Tabella 6: Caratteristiche termofisiche parete E

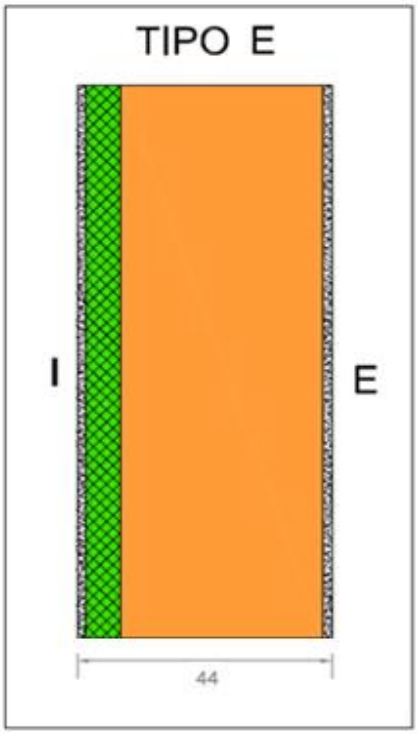

Figura 8: Sezione parete E

4.5 Parete M

Si tratta di una parete isolata sia internamente che esternamente, del tipo a blocchi cassero in eps con getto interno in calcestruzzo.

Descrizione degli strati	**Spessore (d)** [m]	**Conduttività termica (l)** [W/mK]	**Calore specifico (c)** [J/kgK]	**Densità (ρ)** [kg/ m^3]	**Resistenza termica (Rt)** [m^2K/W]
Aria esterna					0,040
Intonaco esterno	0,015	0,530	1000	1500	0,028
Isolamento EPS	0,064	0,032	1450	20	2,000
Calcestruzzo	0,200	1,600	1000	2300	0,125
Isolamento EPS	0,064	0,032	1450	20	2,000
Intonaco interno	0,015	0,530	1000	1500	0,028
Aria interna					0,130

Spessore tot [m]	0,358
Rtot [m^2K/W]	4,351
U [W/m^2K]	0,230

Tabella 7: Caratteristiche termofisiche parete M

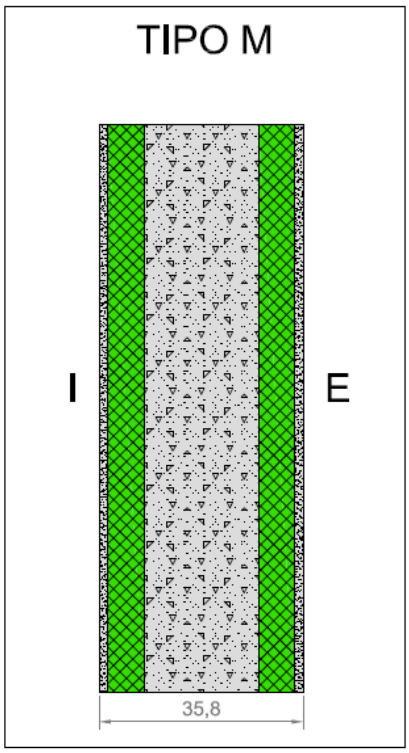

Figura 9: Sezione parete M

5. Metodi di calcolo dinamico del camportamento termico di strutture opache

Nel presente capitolo verranno illustrati i metodi utilizzati per la determinazione dei flussi interno ed esterno,relativi alle strutture opache analizzate.

Nello specifico verranno spiegati in dettaglio i metodi proposti da:

- UNI EN ISO 13786
- UNI EN ISO 52016-1, Allegato B;
- UNI EN ISO 52016-1, Allegato A;
- Software Ansys Fluent.

Per affrontare lo studio della conduzione in regime dinamico è necessario risolvere l'equazione di Fourier:

$$\alpha[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}]=\frac{\partial T}{\partial t} \qquad \text{con} \qquad \alpha=\frac{\lambda}{\rho * Cp}$$

valida per un mezzo omogeneo ed isotropo, con diffusività termica α, in assenza di generazione di calore. Nell'ipotesi semplificativa di flusso termico monodimensionale, ossia per una parete piana indefinita di spessore costante, l'equazione di Fourier diviene

$$\frac{\partial T}{\partial t}= \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Per avere dei risultati attendibili sul comportamento dinamico di una parete e sugli effetti della sua inerzia termica è necessario affrontare in termini più generali l'integrazione dell'equazione di Fourier.

La soluzione dell'equazione di Fourier si basa su ipotesi semplificative:

- Spessore semi-infinito della parete
- Parete piana indefinita
- Spessore costante
- Mezzo isotropo ed omogeneo
- Diffusività del materiale costante

Volendo fare una prima classificazione dei metodi per l'integrazione dell'equazione di Fourier, possiamo distinguerli in :

- Analitici
- Numerici

I metodi analitici prevedono i seguenti passi principali :

1)rappresentazione dei dati di ingresso come somma di funzioni elementari;
2)risoluzione dell'equazione di Fourier mediante operatori matematici;
3)individuazione, in forma matriciale, delle funzioni di trasferimento dello strato termico elementare;
4)determinazione delle proprietà della parete attraverso il prodotto delle matrici contenenti le proprietà dei singoli strati;
5)determinazione delle grandezze d'uscita in corrispondenza dei segnali di ingresso elementari;
6)calcolo degli andamenti delle grandezze d'uscita in corrispondenza dei dati di ingresso discreti sfruttando la linearità del sistema e quindi la sovrapposizione degli effetti

I metodi numerici prevedono:
1)la discretizzazione dello spazio interessato al fenomeno propagatorio;
2)la definizione di legami spazio-temporali che rendano stabile la soluzione numerica;
3)la risoluzione locale dell'equazione di Fourier senza l'uso di operatori matematici;
4)la costruzione di un sistema di equazioni il cui numero è correlato al numero di discretizzazioni spaziali operate;
5)la risoluzione del sistema di equazioni attraverso i metodi dell'algebra numerica .

Tutti i metodi utilizzano procedure che vanno ripetute più volte e che quindi possono essere vantaggiosamente implementate su computer.

5.1 Metodo analitico UNI EN ISO 13786

L'individuazione di un metodo che permettesse di valutare analiticamente l'entità delle densità dei flussi di calore interni ed esterni in regime dinamico,ha condotto alla scelta di relazioni analitiche riportate nella norma UNI EN ISO 13786 " Prestazione termica dei componenti per edilizia-Caratteristiche termiche dinamiche -Metodi di Calcolo".

"La norma definisce metodi per il calcolo del comportamento termico in regime dinamico di componenti edilizi completi. Inoltre essa specifica quali siano le informazioni sul componente edilizio necessarie per il calcolo."

Si consideri uno strato di materiale (elemento) che separa le zone n ed m; lo strato è costituito da un materiale omogeneo, isotropo e compreso tra superfici piane e parallele.

Sulla parete n è applicata una variazione sinusoidale della temperatura:

$\theta_n(t) = \bar{\theta}_n + |\hat{\theta}_n| + \cos(\omega t + \psi)$;

- $\bar{\theta}_n$ Temperatura media sulla parete n;
- $|\hat{\theta}_n|$ Ampiezza della variazione di temperatura su n;
- ω Frequenza angolare della variazione termica [rad/s] =2p/T;
- T Periodo considerato [s];
- Ψ Fase iniziale [s].

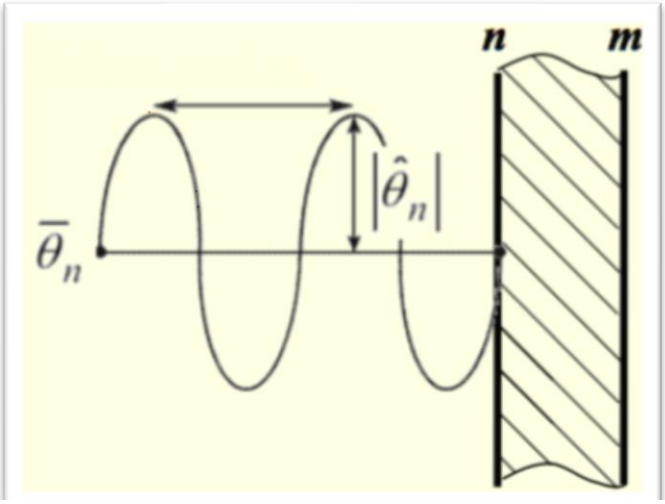

Figura 10: Variazione sinusoidale di $\theta_n(t)$

L'equazione di Fourier per la conduzione in regime transitorio diviene:

$$\frac{\partial^2[\bar{\theta}_n+\frac{1}{2}(\hat{\theta}_n e^{i\omega t}+\hat{\theta}_n e^{-i\omega t})]}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial[[\bar{\theta}_n+\frac{1}{2}(\hat{\theta}_n e^{i\omega t}+\hat{\theta}_n e^{-i\omega t})]}{\partial t}$$

che restituisce un'equazione differenzale di 2° ordine la cui soluzione è del tipo:

$$y_1 = C_1 e^x + C_2 e^{-x}$$

Dalla risoluzione del problema di Cauchy, il legame tra variazione dei flussi termici e variazione di temperatura si puo scrivere in maniera matriciale come:

$$\begin{pmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{q}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\theta}_n \\ \hat{q}_n \end{pmatrix}$$

Con $\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix}$ matrice di trasferimento Z, dove i coefficienti complessi si calcolano come segue:

$$Z_{11} = Z_{22} = cosh(\xi)cos(\xi) + jsinh(\xi)sin(\xi)\ ;$$

$$Z_{12} = -\frac{\delta}{2\lambda}\{sinh(\xi)cos(\xi) + cosh(\xi)sin(\xi) + j[cosh(\xi)sin(\xi) - sinh(\xi)cos(\xi)]\}\ ;$$

$$Z_{21} = -\frac{\lambda}{\delta}\{sinh(\xi)cos(\xi) - cosh(\xi)sin(\xi) + j[sinh(\xi)cos(\xi) + cosh(\xi)sin(\xi)]\}\ .$$

con $\delta = \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi\, \rho c}}$ e $\xi = \frac{d}{\delta}$, definiti rispettivamente come profondità di penetrazione e rapporto tra lo spessore dello strato e la profondità di penetrazione.

Nota la matrice di trasferimento Z si possono valutare i parametri caratteristici del comportamento in regime dinamico delle strutture a seguito di una variazione sinusoidale delle condizioni al contorno in particolare:

- **Trasmittanza termica periodica Y_{mn}:** è un numero complesso definito come l'ampiezza del flusso termico attraverso la superficie del componente adiacente la zona m rispetto all'ampiezza della variazione di temperatura nella zona n,quando la temperatura nella zona m è mantenuta costante.Perciò la trasmittanza termica periodica rappresenta il rapporto tra la variazione di flusso termico in un mabiente e la variazione di temperatura sull'altro ambiente.

$Y_{mn} = \frac{\hat{q}_m}{\hat{\theta}_n}$ con $\hat{q}_m$ densità di flusso termico " lato m" e $\hat{\theta}_n$ ampiezza delle temperature "lato n"

- **Ammettenza termica Y_{mm}**: è un numero complesso definito come l'ampiezza del flusso termico attraverso la superficie del componente adiacente la zona m rispetto all'ampiezza della variazione di temperatura nella stessa zona ,quando la temperatura nell'altro lato è mantenuta costante.Perciò l'ammettenza termica rappresenta il rapporto tra la variazione di flusso termico in un ambiente e la variazione di temperatura sul medesimo ambiente:

$\mathbf{Y_{mm}} = \frac{\hat{q}_m}{\hat{\theta}_m}$ con $\hat{q}_m$ densità di flusso termico " lato m" e $\hat{\theta}_m$ ampiezza delle temperature "lato m"

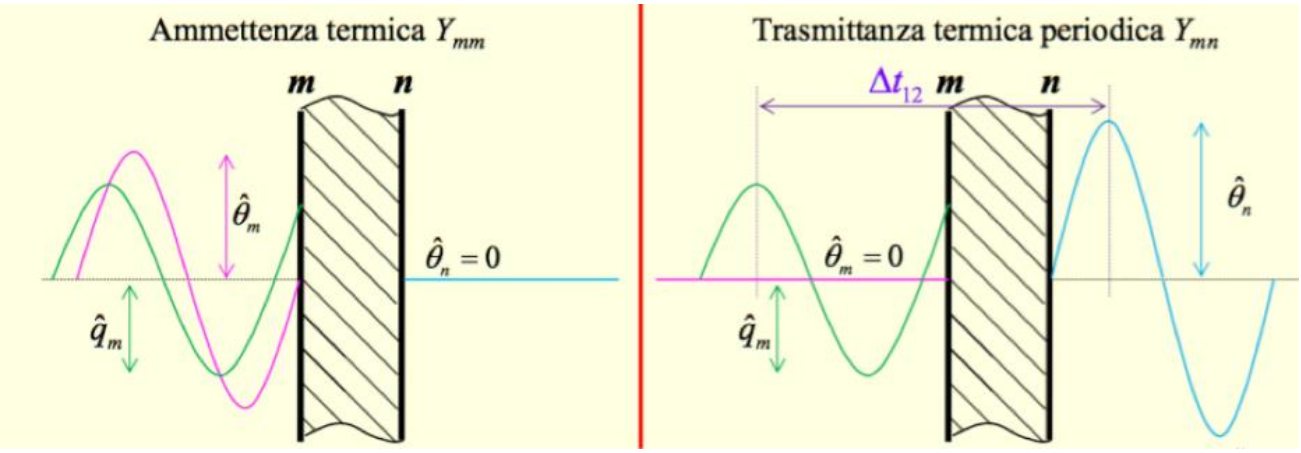

Figura 11:Ammettenza termica e trasmittanza termica periodica

Nel fenomeno analizzato ,considerato che all'interno la temperatura è stata posta pari ad un valore costante,dalle definizioni sopra riportate si evince come per " lato m" si è inteso il lato esterno,mentre per il lato "n" il lato interno.Dunque è possibile scrivere le precedenti relazioni come segue:

$$\mathbf{Y_{ie}} = \frac{\hat{q}_i}{\hat{\theta}_e} \qquad \mathbf{Y_{ee}} = \frac{\hat{q}_e}{\hat{\theta}_e}$$

L'ammettenza termica interna,invece,non è stata utilizzata in quanto per definizione sarebbe dovuta rimanere costante la temperatura ambiente esterna,che invece nei casi analizzati varia continuamente con andamento cosinusoidale.

Tale metodo di calcolo dei flussi termici interni ed esterni è stato utilizzato solamente per la simulazione con input armonico,in quanto nel tesyo della norma UNI EN ISO 13786 è espressamente dichiarato che possono essere considerate soamente condizioni al contorno con variazioni periodiche sinusoidali della temperatura o della densità di flusso termico.

I dati richiesti per calcolare le caratteristiche termiche dinamiche sono:

1. i disegni dettagliati del prodotto,con le dimensioni;
2. per ogni materiale utilizzato nel prodotto occorrono conduttività termica λ,capacità termica specifica c e la densità ρ.

Sia la trasmittanza termica periodica sia l'ammettenza termica esterna sono state calcolate attraverso un'analisi preliminare dell'elemento opaco svolta avvalendosi di un foglio di calcolo excel.

1) Scegliere il tipo di componente edilizio

Chiusura verticale

2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore) **24**

Periodo delle variazioni termiche T	[sec]	86400
Resistenza termica sup interna Rsi	[m2K/W]	0,13
Resistenza termica sup esterna Rse	[m2K/W]	0,04

		Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m2k/w]
Rsi	Aria	Strato laminare interno		1	2	3	4	5			0,130
1		Intonaco interno	0,0150	0,530		1000	1500		0,099	0,152	0,028
2		Muratura	0,3500	0,180		1000	750		0,081	4,308	1,944
3		isolante	0,0600	0,036		1450	20		0,185	0,325	1,667
4		Intonaco esterno	0,0100	0,530		1000	1500		0,099	0,101	0,019
5									-	-	-
Rse	Aria	Strato laminare esterno									0,040

Spessore totale componente [cm] **43,50** — Resistenza termica totale [m2K/W] **3,828**

http://www.mygreenbuildings.org — **RISULTATI** — 2011 @ Ing. Andrea Ursini Casalena

Regime periodico stabilizzato		T = 24 ore			Regime stazionario			
Fattore di decremento (attenuazione)	**fd**	[-]	**0,035**		**Massa superficiale**	**Ms**	[kg/m2]	**301**
Ritardo fattore di decremento (sfasamer	**φ**	[h]	**17,99**		Resistenza termica totale	**Rt**	[m2K/W	**3,828**
Trasmittanza termica periodica	**|Yie|**	[W/m2K]	**0,009**		**Trasmittanza**	**U**	[W/m2K	**0,261**
Ammettenza termica lato interno	**Yii**	[W/m2K] , [h]	**3,04**	*2,48*	Conduttanza	**C**	[W/m2K	**0,273**
Ammettenza termica lato esterno	**Yee**	[W/m2K] , [h]	**1,27**	*4,21*	Capacità termica areica	**Cta**	[kJ/m2K	**302**
Capacità termica periodica lato interno	**k1**	[kJ/m2K]	**41,7**	*57,4*	Costante di tempo	**τ**	[h]	**321**
Capacità termica periodica lato esterno	**k2**	[kJ/m2K]	**17,4**	*17,8*				
Fattore di smorzamento superficiale interno								
Parete disperdente	**fsd**	[-]	**0,605**	*0,835*				
Parete interna	**fsi**	[-]	**0,606**	*0,836*				

Figura 12: Foglio excel per il calcolo dei parametri termici dinamici

Di seguito si riportano, dunque, i valori delle suddette caratteristiche termiche dinamiche relative ai cinque elementi opachi analizzati nel presente studio, a cui sono stati affiancati i valori di resistenza termica e di capacità termica areica tipici del regime stazionario, così da disporre di tutte le diverse proprietà necessarie ai successivi confronti.

Da notare che la fase della trasmittanza termica periodica coincide con il coefficiente di sfasamento dell'onda termica, misurato in ore,e definito come il ritardo temporale tra il massimo del flusso termico entrante nell'ambiente interno ed il massimo della temperatura dell'ambiente esterno.
Il fattore di attenuazione dell'onda termica, invece, è definito come il rapporto tra il modulo della trasmittanza termica periodica e la trasmittanza termica in condizioni stazionarie, perciò adimensionale.

	REGIME DINAMICO					REGIME STAZIONARIO	
	Trasmittanza termica periodica		Ammettenza termica esterna		Fattore di attenuazione	R_{tot}	k_{tot}
	Modulo [W/m^{2}K]	Fase	Modulo [W/m^{2}K]	Fase [h]			
PARETE D	**1,619**	**6,04**	**10,99**	**1,89**	**0,488**	**0,301**	**483**
PARETE I	**0,009**	**17,9**	**1,27**	**4,21**	**0,035**	**3,828**	**302**
PARETE	**0,059**	**12,6**	**4,14**	**3,23**	**0,200**	**3,362**	**227**
PARETE E	**0,015**	**16,1**	**3,80**	**3,28**	**0,053**	**3,619**	**280**
PARETE M	**0,006**	**9,98**	**1,71**	**4,61**	**0,025**	**4,352**	**509**

Tabella 8: Caratteristiche termiche dinamiche degli elementi opachi analizzati

A partire dai valori delle caratteristiche termiche dinamiche ,utilizzando le formule precedentemente riportate ,è possibile individuare i valori delle densità dei flussi interni ed esterni all'elemento opaco per ogni ora di simulazione : più precisamente tali valutazioni conducono esclusivamente alla stima delle ampiezze e non del valore assoluto della densità dei flussi.

Densità di flusso esterno :

$$q_{e_{(t)}} = |\hat{q}_e| \cdot cos\,[(\omega(t + \varphi_e)]$$

$$|\hat{q}_e| = Y_{ee} \cdot |\hat{\theta}_e|$$

$$\varphi_e = \psi_{Y_{ee}} + \psi_e$$

Densità di flusso interno:

$$q_{i_{(t)}} = |\hat{q}_i| \cdot cos\,[(\omega(t + \varphi_i)]$$

$$|\hat{q}_i| = Y_{ie} \cdot |\hat{\theta}_e|$$

$$\varphi_i = \psi_{Y_{ie}} + \psi_e$$

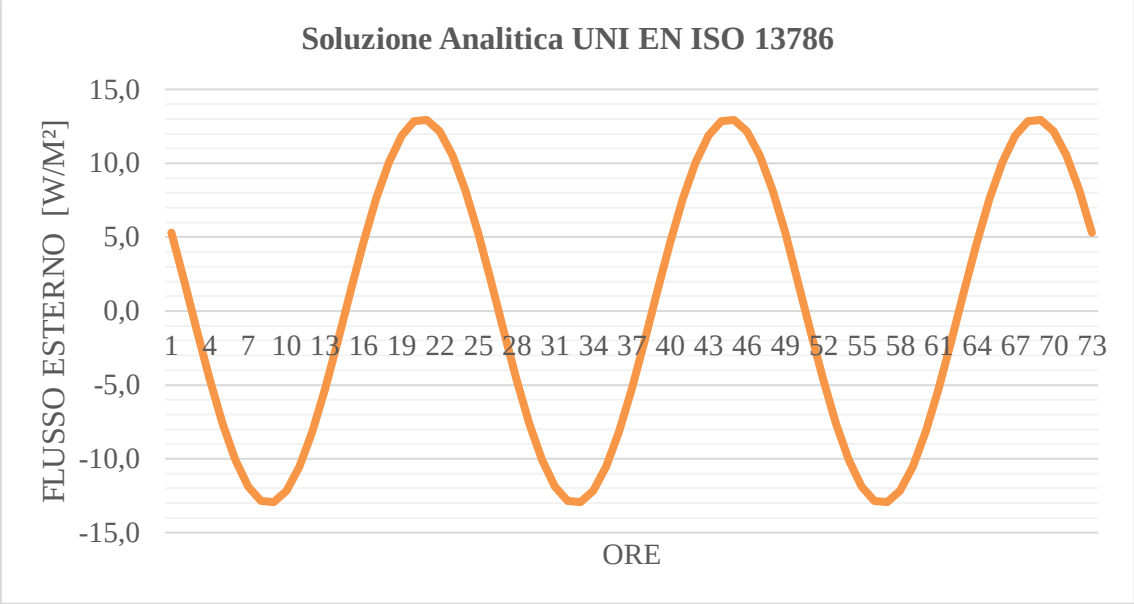

figura 13: Andamento del flusso esterno parete I secondo UNI EN ISO 13786

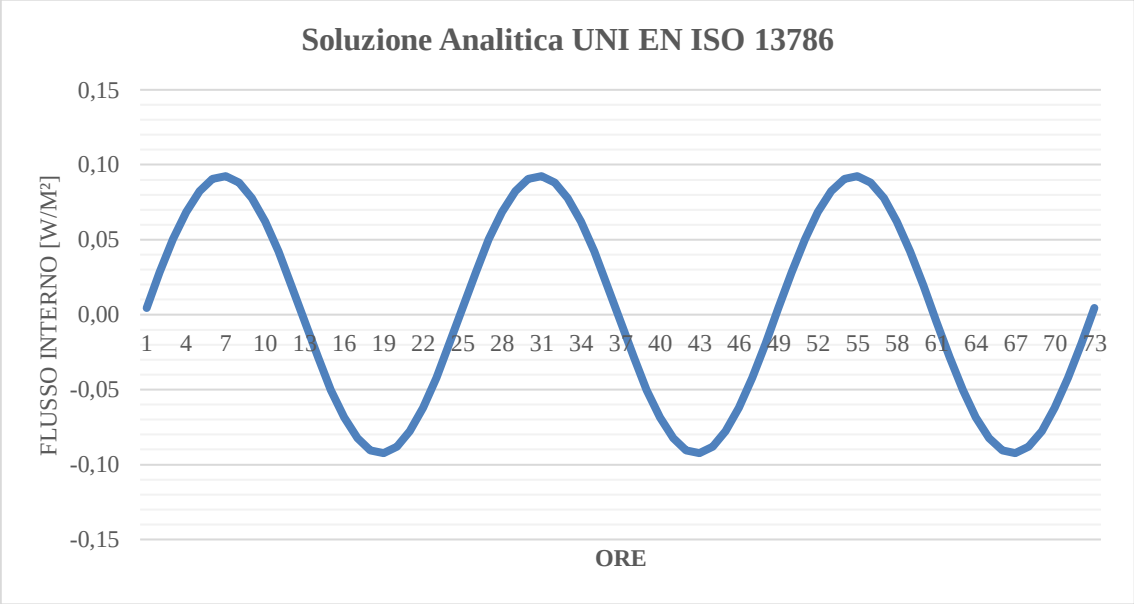

Figura 14 : Andamento del flusso interno parete I secondo UNI EN ISO 13786

Ore	θest	θint	**Ampiezza Flusso Esterno**	**Ampiezza Flusso Interno**
0	10,0000	0	5,3186	0,0046
1	9,6593	0	2,0673	0,0284
2	8,6603	0	-1,3250	0,0502
3	7,0711	0	-4,6270	0,0686
4	5,0000	0	-7,6136	0,0823
5	2,5882	0	-10,0814	0,0904
6	0,0000	0	-11,8622	0,0924
7	-2,5882	0	-12,8346	0,0881
8	-5,0000	0	-12,9323	0,0777
9	-7,0711	0	-12,1487	0,0621
10	-8,6603	0	-10,5372	0,0422
11	-9,6593	0	-8,2076	0,0195
12	-10,0000	0	-5,3186	-0,0046
13	-9,6593	0	-2,0673	-0,0284
14	-8,6603	0	1,3250	-0,0502
15	-7,0711	0	4,6270	-0,0686
16	-5,0000	0	7,6136	-0,0823
17	-2,5882	0	10,0814	-0,0904
18	0,0000	0	11,8622	-0,0924
19	2,5882	0	12,8346	-0,0881
20	5,0000	0	12,9323	-0,0777
21	7,0711	0	12,1487	-0,0621
22	8,6603	0	10,5372	-0,0422
23	9,6593	0	8,2076	-0,0195
24	10,0000	0	5,3186	0,0046

Tabella 9: Valori dei flussi interno ed esterno al variare delle ore

5.2 Metodi numerici- Il metodo alle differenze finite

In questa sezione ci occuperemo di esporre il metodo alle differenze finite.

L'obiettivo è valutare la temperatura del corpo in funzione dello spazio e del tempo.

Questo metodo giunge al risultato risolvendo ricorsivamente semplici equazioni algebriche e si contrappone alla soluzione analitica dell'equazione differenziale di Fourier.

Il metodo implica il dover ripetere calcoli per un gran numero di volte,ben si presta quindi alla sua implementazione su calcolatore.

Il metodo richiede di effettuare una discretizzazione spaziale che consiste nel dividere il corpo in tanti volumetti di dimensione finita.Ciascuno di questi volumetti viene concentrato in un nodo puntiforme situato al centro del volumetto stesso.La massa e le altre proprietà del volumetto sono addensate nel nodo corrispondente.

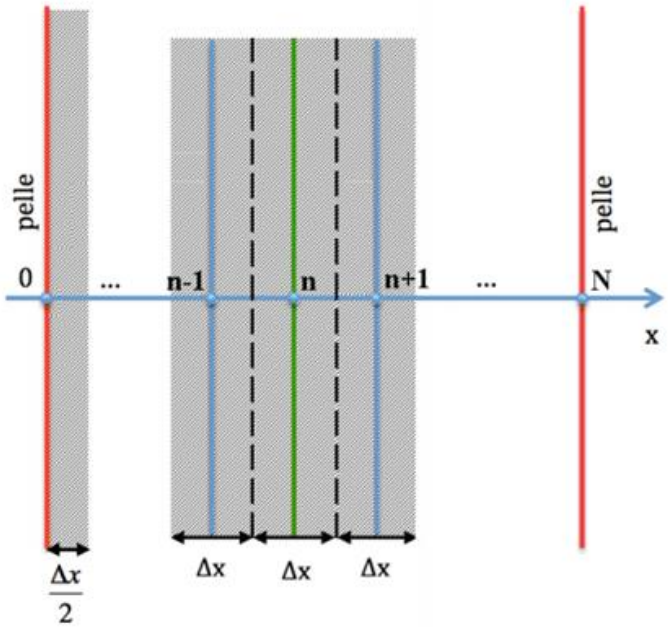

Figura 15: Discretizzazione della parete in N nodi

I nodi sono numerati partendo da 0,per cui se si indica con N l'ultimo nodo ,i nodi sono complessivamene N+1.

5.2.1 Metodo esplicito o all'avanti

Si ricavano le equazioni che permettono di calcolare le temperature dei nodi all'istante t+1 partendo dalla conoscenza delle temperature all'istante t.

Le equazioni sono ricavate a partire da considerazioni energetiche analoghe a quelle che portano all'equazione differenziale di Fourier.

Al posto dei differenziali dx e dt si considerano le variazioni finite Δx e Δt , da qui il nome di metodo alle differenze finite.Occorre distinguere il caso dei nodi interni da quello dei nodi di pelle.Consideriamo dapprima il caso dei nodi interni.Ogni nodo scambia calore per conduzione con i due nodi adiacenti.Due nodi sono separati da uno strato di lastra piana spesso Δx ,per cui la

resistenza termica che caratterizza lo scambio termico per conduzione tra due nodi può essere espressa nel modo seguente:

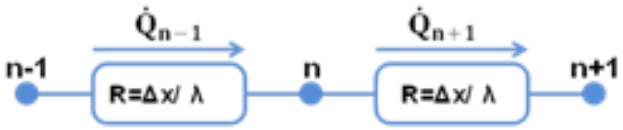

Figura 16: Bilancio di energia per i nodi interni

E' possibile calcolare calore ΔQ complessivamente entrante nel nodo n all'intervallo di tempo $\Delta\tau$.

$$\Delta Q = \Delta t^{*}\left[\dot{Q}_{n-1} - \dot{Q}_{n+1}\right] = \frac{\lambda \cdot \Delta\tau}{\Delta x}\left[T(n-1,t) - 2 * T(n,t) + T(n+1,t)\right]$$

Dato che il sistema non compie lavoro($\Delta L = 0$), per il primo principio della termodinamica risulta $\Delta Q = \Delta H$, ovvero il calore scambiato deve essere uguale alla variazione di entalpia subita dal nodo n nell'intervallo di tempo Δt.

$$\Delta H = m \cdot c_p \cdot [T(n,t+1) - T(n,t)]$$

Uguagliando le due espressioni:

$$\frac{\lambda \cdot \Delta\tau}{\Delta x} \cdot [T(n-1,t) - 2 \cdot T(n,t) + T(n+1,t)] = \rho \cdot \Delta x \cdot c_p \cdot [T(n,t+1) - T(n,t)]$$

Riordinando i termini per esplicitare l'incognita T(n,t+1):

$$T(n,t+1) = \left(1 - 2 \cdot \frac{\lambda \cdot \Delta\tau}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta x^2}\right) \cdot T(n,t) + \frac{\lambda \cdot \Delta\tau}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta x^2} \cdot [T(n-1,t) + T(n+1,t)]$$

Si definisce il parametro adimensionale K, detto anche "numero di Fourier":

$$K = \frac{\lambda \cdot \Delta\tau}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta x^2} = \frac{\alpha \cdot \Delta\tau}{\Delta x^2}$$

Per cui l'espressione di T(n,t+1) diventa:

$$T(n,t+1) = (1 - 2 \cdot K) \cdot T(n,t) + K \cdot [T(n-1,t) + T(n+1,t)]$$

Nel caso dei nodi di pelle l'equazione appena trovata non può essere utilizzata. Si considera il nodo 0,per il nodo N il discorso è del tutto analogo tenendo conto della possibilità che temperature ambiente e coefficienti convettivi siano diversi a seconda del lato considerato.

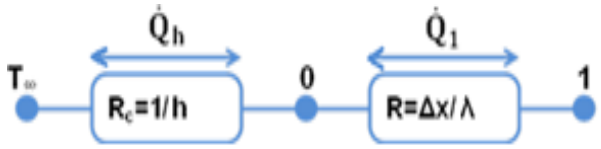

Figure 17 : Bilancio di energia per i nodi di pelle

Il nodo 0 scambia calore per conduzione con il nodo 1 e per convezione con l'ambiente esterno.E' possibile calcolare in modo analago a prima il calore complessivamente entrante nel nodo 0 nel medesimo intervallo di tempo $\Delta\tau$.

$$\Delta Q = \Delta\tau \cdot \left[\dot{Q}_h - \dot{Q}_1\right] = \Delta H$$

con

$$\dot{Q}_h = \frac{1}{R_c} \cdot [T_\infty - T(0,t)] = h \cdot S \cdot [T_\infty - T(0,t)]$$

$$\dot{Q}_1 \equiv \left(\dot{Q}_{n+1}\right)_{n=0} = \frac{1}{R} \cdot [T(0,t) - T(1,t)]$$

Si ottiene quindi:

$$T(0,t+1) = \frac{2 \cdot h \cdot \Delta\tau}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta x} \cdot T_\infty + \left(1 - \frac{2 \cdot h \cdot \Delta\tau}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta x} - 2 \cdot \frac{\lambda \cdot \Delta\tau}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta x^2}\right) \cdot T(0,t) + 2 \cdot \frac{\lambda \cdot \Delta\tau}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta x^2} \cdot T(1,t)$$

Ponendo $H = \frac{2 \cdot h \cdot \Delta\tau}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta x}$,si ottiene:

$$T(0,t+1) = H \cdot T_\infty + (1 - H - 2 \cdot K) \cdot T(0,t) + 2 \cdot K \cdot T(1,t).$$

In forma matriciale:

$$\begin{vmatrix} 1-H-2K & -2K & 0 & 0 & 0 \\ K & 1-2K & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K & 1-2K & K \\ 0 & 0 & 0 & 2K & 1-H-2K \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} T_0 \\ T_1 \\ \dots \\ T_{n-1} \\ T_n \end{vmatrix}^{t+1} = \begin{vmatrix} T_0 \\ T_1 \\ \dots \\ T_{n-1} \\ T_n \end{vmatrix}^{t} + \begin{vmatrix} T_\infty * H \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ T_\infty * H \end{vmatrix}$$

dove le temperature al tempo t+1 sono incognite,mentre quelle al tempo t sono note.

Il limite del metodo esplicito è che non è possibile scegliere un $\Delta\tau$ grande a piacere. Il metodo alle differenze finite in avanti,o esplicito,risulta essere stabile quando sono rispettate entrambe le condizioni:

- per i nodi interni $\Delta\tau < \Delta\tau_{lim} = \frac{1}{2}\frac{\Delta x^2}{\alpha}$
- per i nodi di pelle $\Delta\tau < \Delta\tau_{lim,pelle} = \frac{1}{2}\frac{\Delta x^2}{\alpha} * \frac{1}{1+\frac{h\,\Delta x}{\lambda}}$

La soluzione è stabile quando entrambe le condizioni sono rispettate.
A titolo di esempio si riportano i grafici relativi ai profili di temperatura della parete D nel caso si scelga un $\Delta\tau$ che nn rispetta le condizioni limite($\Delta\tau_{lim} = 495{,}3$ sec)

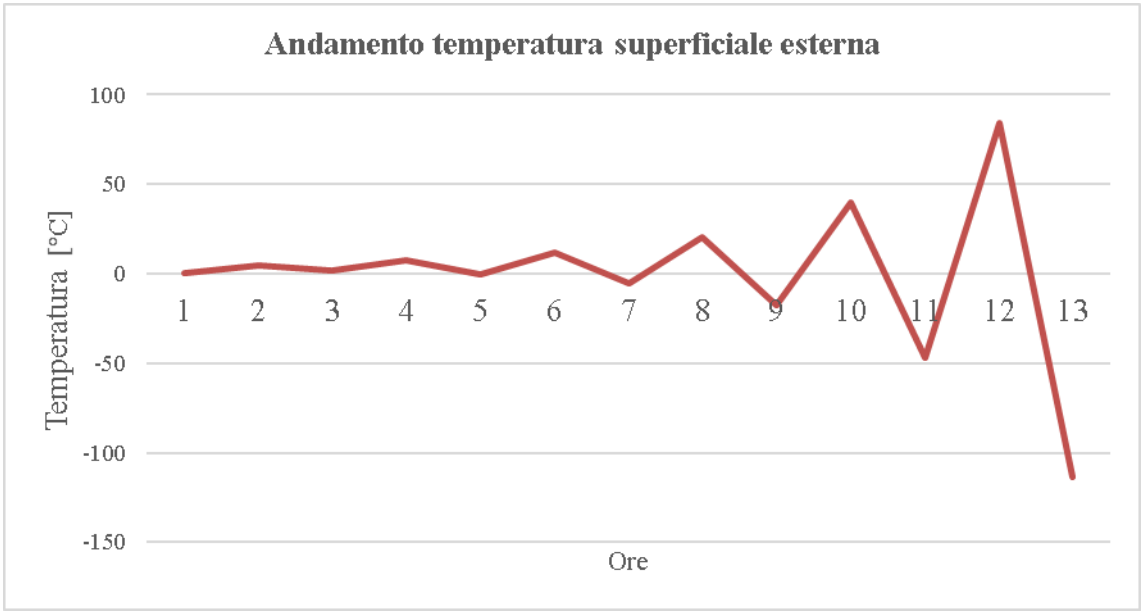

Figure 18: Andamento anomalo della temperatura superficiale esterna a seguito di un $\Delta\tau > \Delta\tau_{lim}$ (600 sec)

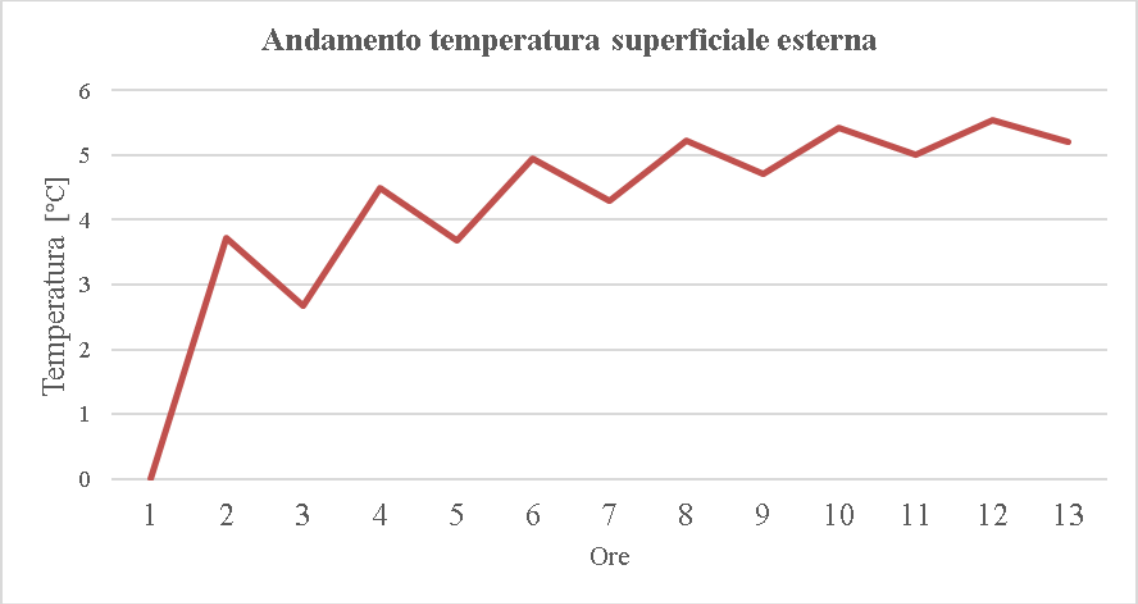

Figure 19: Andamento anomalo della temperatura superficiale esterna a seguito di un $\Delta\tau_{lim,pelle} < \Delta\tau < \Delta\tau_{lim}$ (450 sec)

E' facile intuire come entrambe le condizioni debbano essere rispettate per evitare oscillazioni anomale delle soluzioni.

5.2.2 Metodo implicito o all'indietro

E' possibile usare anche metodi impliciti che permettono di ricavare le temperature al tempo t da quelle vecchie al tempo t-1.

$$\begin{vmatrix} 1+H+2K & -2K & 0 & 0 & 0 \\ -K & 1+2K & -K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K & 1+2K & -K \\ 0 & 0 & 0 & 2K & 1+H+2K \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} T_0 \\ T_1 \\ \dots \\ T_{n-1} \\ T_n \end{vmatrix}^{t} = \begin{vmatrix} T_0 \\ T_1 \\ \dots \\ T_{n-1} \\ T_n \end{vmatrix}^{t-1} + \begin{vmatrix} T_\infty * H \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ T_\infty * H \end{vmatrix}$$

dove con n si intende il numero dei nodi e con T_∞ la temperatura ambiente interna ed esterna.

Si nota che le quantità poste nella diagonale ,a differenza del metodo esplicito in avanti , sono sempre positive. Quindi il metodo esplicito risulta stabile per qualsiasi valore di $\Delta\tau$.

5.3 UNI EN ISO 52016

La norma UNI EN ISO 52016 pubblicata a Luglio 2017 fa parte di un pacchetto di norme denominate "EPBD" (Energy Performance Buildings Directive) in fase di aggiornamento.Si tratta di uno dei circa 90 documenti che il CEN(Comitato di Normazione Europeo) sta revisionando su mandato della commissione europea. Il compito di revisione riguarda sia l'aggiornamento dei contenuti che l'aggioramento dell'impianto normativo stesso.Le norme propongono nuove procedure per la valutazione:

– dei fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento,

– delle temperature interne,

– e dei carichi termici sensibili e latenti.

Il calcolo dinamico consente di tenere in considerazione le variazioni orarie del clima e delle azioni dell'utente:è possibile infatti determinare l'effetto della gestione dei sistemi di ombreggiamento ,della presenza delle persone,dell'impostazione oraria dei termostati oltre che ovviamente delle scelte costruttive che modificano l'inerzia termica dell'edificio.Il calcolo viene svolto per ogni zona termica considerata ,determinando per ognuna di esse i fabbisogni per riscadaento o raffrescamento.

E' bene ricordare che oggi il ricorso ad una simulazione dinamica non è obbligatorio,ovvero la legge italiana ora come ora non impone infatti il calcolo dinamico,il riferimento "ufficiale" infatti resta il metodo semi-stazionario medio mensile descritto dalle nome UNI/TS 11300.

Sembra però che gli aggiornamenti legislativi e normativi in arrivo nei prossimi anni introdurranno il metodo dinamico descritto dalla norma UNI EN ISO 52016-1 tra i possibili strumenti di analisi,o adirittura lo indicheranno come l'unico metodo da adottare per il calcolo dei fabbisogni energetici degli edifici.

5.3.1 Modello di calcolo secondo EN ISO 52016 Par. 6.5 e applicazione ai casi di studio

Le strutture opache sono analizzate attraverso uno schema RC(resistenze-condensatori)ridotto a 5 nodi che sintetizza i possibili fenomeni resistivi(resistenza termica) e capacitivi(accumulo/rilascio energetico nel tempo) in atto.

Per l'utente significa che ogni struttura opaca che compone la zona termica deve essere descritta attraverso:

- la trasmittanza termica espressa in W/m^2
- la capacità termica totale della struttura espressa in KJ/m^2K
- l'informazione sulla distribuzione della massa scegliendo tra:

  1.concentrata sul lato interno

  2.concentrata sul lato esterno

  3.divisa sul lato interno

  4.equamente distribuita

  5.concentrata al'interno della struttura

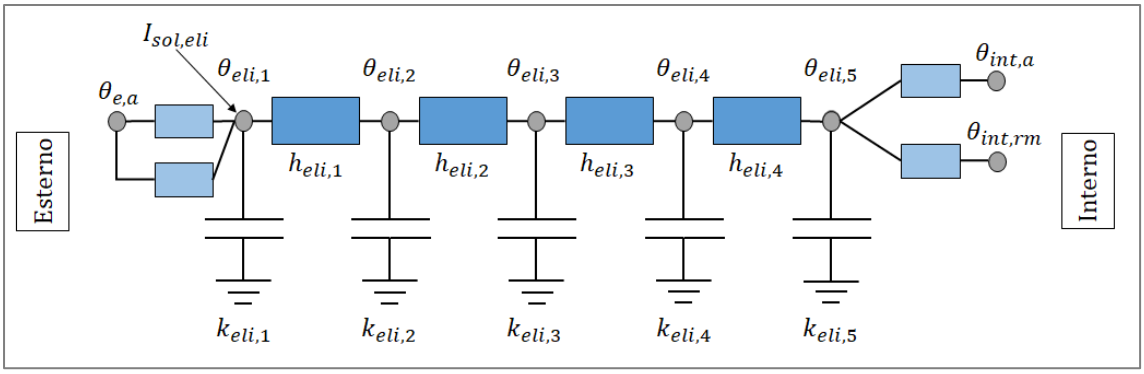

Figura 20: Discretizzazione con numero di nodi fissi

La norma propone un metodo di calcolo per assegnare i valori alle varie conduttanze $h_{eli,n}$ e capacità termiche $k_{eli;n}$, per quest'ultime va considerata la posizione della massa dell'elemento opaco nella stratigrafia: poiché di regola i materiali coibenti hanno densità bassa mentre i materiali conduttivi hanno densità elevata, se l'isolamento principale è interno, la massa sta all'esterno e viceversa.

Sono previsti 5 differenti casi di posizionamento della massa termica indicati nella norma con le sigle I, E, IE, D, M, in funzione dei quali è distribuita la capacità termica.

Class	Specification of the class
Class I (mass concentrated at internal side)	Construction with external thermal insulation (main mass component near inside surface) , or equivalent
Class E (mass concentrated at external side)	Construction with internal thermal insulation (main mass component near outside surface) , or equivalent
Class IE (mass divided over internal and external side)	Construction with thermal insulation in between two main mass components, or equivalent
Class D (mass equally distributed)	Uninsulated construction (e.g. solid or hollow bricks, heavy or lightweight concrete, or lightweight construction with negligible mass (e.g. steel sandwich panel), or equivalent

Tabella 10: Classificazione parete opache secondo la Tabella B.13 UNI EN ISO 52016-1

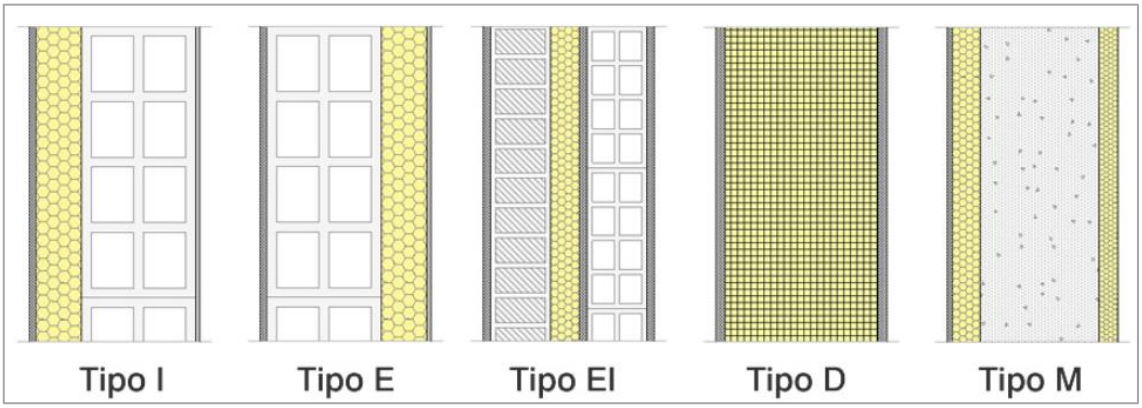

Figura 21: Stratigrafia delle classi di pareti riportate in tabella B.13 secondo UNI EN ISO 52016

Classe I

La massa termica è sul lato interno della parete in questo caso tutta la capacità termica è attribuita al nodo interno 5:

$k_{eli;5} = k_{eli;m}$

$k_{eli;1} = k_{eli;2} = k_{eli;3} = k_{eli;4} = 0$

Classe E

La massa termica è sul lato esterno della parete;in questo caso tutta la capacità termica è attribuita al nodo esterno 1:

$k_{eli;1} = k_{eli;m}$

$k_{eli;2} = k_{eli;3} = k_{eli;4} = k_{eli;5} = 0$

Classe EI

La massa termica è in parte sul lato interno in parte sul lato esterno della parete; in questo caso tutta la capacità termica complessiva è suddivisa tra i nodi interno ed esterno 1 e 5:

$k_{eli;1} = k_{eli;5} = k_{eli;m}/2$

$k_{eli;2} = k_{eli;3} = k_{eli;4} = 0$

Classe D

La massa termica è distribuita su tutto lo spessore della parete;in questo caso la capacità termica complessiva è suddivisa fra tutti gli strati in questo modo:

$k_{eli;2} = k_{eli;3} = k_{eli;4} = k_{eli;m}/4$

$k_{eli;1} = k_{eli;5} = k_{eli;m}/8$

Classe M

La massa termica è concentrata al centro della parete;in questo caso tutta la capacità termica complessiva è attribuita al nodo centrale:

$k_{eli;3} = k_{eli;m}$

$k_{eli;1} = k_{eli;2} = k_{eli;4} = k_{eli;5} = 0$

I valori di $k_{eli;m}$ possono essere determinati dalla successiva tabella riportata nella norma, da cui si evince come la capacità termica assuma valori maggiori passando da costruzioni di classe “leggera” a quelle di classe “pesante”.

Class	$\kappa_{m;op}$ J/(m²·K)	Specification of the class
Very light	50 000	Construction containing no mass components, other than e.g. plastic board and/or wood siding, or equivalent
Light	75 000	Construction containing no mass components other than 5 to 10 cm lightweight brick or concrete, or equivalent
Medium	110 000	Construction containing no mass components other than 10 to 20 cm lightweight brick or concrete, or less than 7 cm solid brick or heavy weight concrete, or equivalent
Heavy	175 000	Construction containing 7 to 12 cm solid brick or heavy weight concrete, or equivalent
Very heavy	250 000	Construction containing more than 12 cm solid brick or heavy weight concrete, or equivalent

Tabella 11: Tabella B.14 UNI EN ISO 52016-1

In tutti i casi, indipendentemente dalla localizzazione della massa termica, la resistenza totale è suddivisa sulle conduttanze tra i nodi, attribuendo maggiore potere isolante agli "strati" interni della struttura:

$$h_{eli;1} = h_{eli;4} = \frac{6}{R_{c;eli}}$$

$$h_{eli;2} = h_{eli;3} = \frac{3}{R_{c;eli}}$$

$R_{c;eli}$ Resistenza termica dell'elemento opaco (eli).

La temperatura interna di una zona termica dell'edificio viene calcolata, su base oraria, risolvendo un sistema di equazioni lineari che descrive la trasmissione di calore in regime transitorio tra l'ambiente esterno e interno attraverso gli elementi opachi e trasparenti che delimitano l'involucro della zona. Questo calcolo riguarda i seguenti bilanci termici tra i vari nodi individuati:

- Bilancio termico dell'aria interna alla zona termica, che tiene conto di:
  - scambi termici per convezione con i nodi superficiali di tutte le strutture delimitanti la zona termica;
  - apporti interni;
  - apporti solari diretti attraverso le superfici trasparenti;
  - portata e temperatura dei flussi di aria entranti;
  - parte convettiva della potenza iniettata dall'impianto di riscaldamento e/o raffrescamento;
  - capacità termica dell'aria e dei mobili.
- Bilanci termici dei nodi superficiali delle strutture rivolti verso l'ambiente interno, che tengono conto di:
  - scambi termici per convezione con l'aria interna;
  - scambi termici per conduzione con il nodo interno della medesima struttura;
  - scambi termici per irraggiamento con le altre superfici interne della zona termica;
  - eventuale capacità termica collegata al nodo superficiale.

- Bilanci termici dei nodi interni alle strutture, che tengono conto di:

- scambi termici per conduzione con i nodi adiacenti nella medesima struttura;
- eventuale capacità termica collegata al nodo.

- Bilanci termici dei nodi superficiali delle strutture rivolti verso l'ambiente esterno, che tengono conto di:

- scambi termici convettivi con l'aria esterna;
- apporti solari;
- scambi termici per irraggiamento con la volta celeste.

L'insieme di questi bilanci produce un sistema di equazioni lineari, risolvibile in forma matriciale, che permette di determinare le temperature dei nodi al termine dell'ora considerata.

Le equazioni riportate nella norma rappresentano un'applicazione dell'equazione di Fourier nel caso di conduzione in regime variabile in un mezzo che non è sede di generazione di calore:

$$\alpha \nabla^2 \theta = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

Analizzando il problema in un'unica dimensione spaziale:

$$\alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

Considerato il regime dinamico e la parete senza generazione di calore, lo scenario definito dalla presente equazione coincide esattamente con quanto analizzato nell'attuale studio; pertanto sostituendo alle derivate prima e seconda i rapporti incrementali (ovvero approssimazione mediante il metodo alle differenze finite) e sostituendo la diffusività termica ($\lambda/(\rho c_p)$, si possono ottenere le equazioni della norma da calcolare per ogni nodo per ogni istante temporale.

Alla luce di ciò, noto l'obiettivo prefissato del presente studio, sono stati utilizzati i bilanci termici per determinare le temperature dei vari nodi per ogni ora considerata. Sono stati trascurati i seguenti possibili scambi termici o apporti al fine di poter svolgere un confronto tra i flussi termici nella condizione più favorevole e meno complessa: apporti interni, l'irraggiamento con la le altre superfici interne e con la volta celeste, la presenza di un impianto di riscaldamento e/o raffrescamento, capacità termica dell'aria e dei mobili.

Nelle formule di seguito riportate, relative alle suddette equazioni, con pli viene inteso lo strato i-esimo, con eli l'elemento i-esimo, con t l'istante di tempo in cui si calcola, con t-1 e t+1 l'istante di tempo rispettivamente precedente e successivo.Per il nodo superficiale esterno (pli = pl1):

$$\left(\frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ce;eli} + h_{re;eli} + h_{pli;eli}\right) \cdot \theta_{pli;eli;t} - h_{pli;eli} \cdot \theta_{pli+1;eli;t}$$
$$= \frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1} + \left(h_{ce;eli} + h_{re;eli}\right) \cdot \theta_{e;t}$$
$$+ a_{sol;pli;eli} \cdot \left(I_{sol;dif;eli;t} + I_{sol;dir;eli;t}\ F_{sh;obst;eli;t}\right) - \Phi_{sky;eli;t}$$

Per ogni nodo interno alla parete (pli = pl2, …, pln-1):

$$-h_{pli-1;eli} \cdot \theta_{pli-1;eli;t} + \left[\frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{pli;eli} + h_{pli-1;eli}\right] \cdot \theta_{pli;eli;t} - h_{pli;eli} \cdot \theta_{pli+1;eli;t} = \frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1}$$

Per il nodo superficiale interno (pli = pln):

$$-\left(h_{pli-1;eli} \cdot \theta_{pli-1;eli;t}\right) + \left[\frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ci;eli} + h_{ri;eli} \cdot \sum_{elk=1}^{eln}\left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}}\right) + h_{pli-1;eli}\right] \cdot \theta_{pli;eli;t}$$
$$-h_{ci;eli} \cdot \theta_{int;a;zt;t} - \sum_{elk=1}^{eln}\left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \cdot h_{ri;eli} \cdot \theta_{pli;elk;t}\right)$$
$$= \frac{\kappa_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1} + \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[\left(1 - f_{int,c}\right) \cdot \Phi_{int;ztc;t} + \left(1 - f_{sol,c}\right) \cdot \Phi_{sol;ztc;t} + \left(1 - f_{H/C,c}\right) \cdot \Phi_{HC;ztc;t}\right]$$

Scrivendo queste equazioni per ogni nodo, si ottiene il seguente sistema:

A*θ=B

$$A = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{\Delta t} + h_{ce} + h_1 & -h_1 & 0 & 0 & 0 \\ -h_1 & \frac{k_2}{\Delta t} + h_1 + h_2 & -h_2 & 0 & 0 \\ 0 & -h_2 & \frac{k_3}{\Delta t} + h_2 + h_3 & -h_3 & 0 \\ 0 & 0 & -h_3 & \frac{k_4}{\Delta t} + h_3 + h_4 & -h_4 \\ 0 & 0 & 0 & -h_4 & \frac{k_5}{\Delta t} + h_4 + h_{ci} \end{bmatrix}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_{1,1} \\ \theta_{2,1} \\ \theta_{3,1} \\ \theta_{4,1} \\ \theta_{5,1} \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{\Delta t} * \theta_{1,0} + h_{ce} * \theta_{est,0} \\ \frac{k_2}{\Delta t} * \theta_{2,0} \\ \frac{k_3}{\Delta t} * \theta_{3,0} \\ \frac{k_4}{\Delta t} * \theta_{4,0} \\ \frac{k_5}{\Delta t} * \theta_{5,0} + h_{ci} * \theta_{int,0} \end{bmatrix}$$

K_i ,capacità termica per unità di area dell'i-esimo nodo;

h_{ce} ,coefficiente di scambio termico convettivo sulla superficie esterna;

h_{ci} ,coefficiente di scambio termico convettivo sulla superficie interna;

Δt ,differenza temporale tra 2 istanti successivi = 1h;

$\theta_{i,t}$ temperatura dell'i-esimo nodo (1: superficie esterna, …, 5 :superficie interna) al t-esimo istante;

$\theta_{est,t}$,temperatura dell'ambiente esterno al t-esimo istante;

$\theta_{int,t}$,temperatura dell'ambiente interno al t-esimo istante.

Risolvendo tale sistema lineare con il metodo matriciale $\boldsymbol{\theta}=\mathbf{A}^{-1}*\mathbf{B}$, si ottengono per ogni istante temporale le temperature dei vari nodi a partire dalla conoscenza degli stessi valori all'istante temporale precedente: al fine dell'analisi in oggetto sono rilevanti i valori delle temperature superficiali interne ed esterne dell'elemento opaco, cioè quelle dei nodi estremi. Alla luce di questi valori, note le condizioni al contorno in termini di temperature ambientali interne ed esterne e noti i coefficienti di adduzione su entrambi i lati della parete, è possibile calcolare il valore della densità dei flussi interni ed esterni, utilizzando la seguente relazione:

$$q = h_c * \Delta\theta$$

h_c ,coefficiente di adduzione

Reiterando questo processo per tutti gli istanti temporali necessari, si individua l'andamento dei flussi termici interni ed esterni, funzionali al confronto con gli altri metodi ovvero obiettivo del presente studio.

Di seguito è riportata la discretizzazione di ciascun elemento opaco in 5 nodi,per ognuno dei quali vengono definiti i valori di capacità termica per unità di area e di conduttanza termica necessari all'applicazione del presente metodo.

Parete Tipo D : **Elemento opaco in calcestruzzo privo di isolamento**

Tipo Parete	nodi	*K* pli;eli [J/mqK]	*h* pli;eli [W/mqK]
D	1	31250,0000	19,9256
	2	62500,0000	9,9628
	3	62500,0000	9,9628
	4	62500,0000	19,9256
	5	31250,0000	0,0000

Figura 22 : Valori di capacità termica e conduttanza per i nodi della parete D

Considerata la tipologia di parete,in accordo con la tabella B.13 e B.14 UNI-EN-ISO 52016-1,la parete è considerata "molto pesante": **Km=250000 J/mq*k**

Parete Tipo I : **parete con cappotto esterno**

Tipo Parete	nodi	*K* pli;eli [J/mqK]	*h* pli;eli [W/mqK]
I	1	0	1,5673
	2	0	0,7837
	3	0	0,7837
	4	0	1,5673
	5	250000	0,0000

Figura 23: Valori di capacità termica e conduttanza per i nodi della parete I

Considerata la tipologia di parete,in accordo con la tabella B.13 e B.14 UNI-EN-ISO 52016-1,la parete è considerata "molto pesante": **Km=250000 J/mq***

Parete Tipo EI : parete con isolamento in intercapedine

Tipo Parete	nodi	*K* pli;eli [J/mqK]	*h* pli;eli [W/mqK]
IE	1	125000	1,7847
	2	0	0,8923
	3	0	0,8923
	4	0	1,7847
	5	125000	0,0000

Figura 24: Valori di capacità termica e conduttanza per i nodi della parete IE

Considerata la tipologia di parete,in accordo con la tabella B.13 e B.14 UNI-EN-ISO 52016-1,la parete è considerata "molto pesante": **Km=250000 J/mq***

Parete Tipo E : parete con isolamento interno

Tipo Parete	nodi	*K* pli;eli [J/mqK]	*h* pli;eli [W/mqK]
E	1	250000	1,6578
	2	0	0,8289
	3	0	0,8289
	4	0	1,6578
	5	0	0,0000

Figura 25: Valori di capacità termica e conduttanza per i nodi della parete E

Considerata la tipologia di parete,in accordo con la tabella B.13 e B.14 UNI-EN-ISO 52016-1,la parete è considerata "molto pesante": **Km=250000 J/mq***

Parete Tipo M : parete isolata esternamente ed internamente

Tipo Parete	nodi	*K* pli;eli [J/mqK]	*h* pli;eli [W/mqK]
M	1	0	1,3788
	2	0	0,6894
	3	250000	0,6894
	4	0	1,3788
	5	0	0,0000

Figure 26: Valori di capacità termica e conduttanza per i nodi della parete M

Considerata la tipologia di parete,in accordo con la tabella B.13 e B.14 UNI-EN-ISO 52016-1,la parete è considerata "molto pesante": **Km=250000 J/mq*k**

5.3.2 Modello di calcolo secondo EN ISO 52016 Appendice Nazionale

La norma UNI EN ISO 52016 riporta espressamente che, oltre al metodo descritto nel precedente capitolo, ovvero la suddivisione di un elemento opaco dell'edificio con un numero di nodi fissato pari a 5, sono permesse opzioni alternative di discretizzazione di ogni elemento in nodi resistivi e capacitivi. Tale possibilità può essere individuata nell'allegato A della norma, da cui è possibile calcolare il valore della densità dei flussi termici interni ed esterni attraverso la discretizzazione dell'elemento opaco con un numero di nodi variabile in funzione delle caratteristiche termo-fisiche della parete stessa.

Sostanzialmente l'impianto teorico della norma, basato sul metodo orario dinamico, rimane inalterato e valido anche in questo metodo alternativo; la modifica consiste solamente nell'individuazione e nella quantificazione dei nodi resistivi e capacitivi, ai quali viene assegnato un valore calcolato in funzione delle caratteristiche dello strato fisico reale a cui appartengono. Perciò le equazioni dei bilanci termici rimangono immutate ma, essendo variato il numero dei nodi, per ogni elemento opaco dell'edificio e per ogni ora, sarà generato un sistema lineare in n equazioni (dove n=numero dei nodi) invece dei precedenti sistemi in cui era fissato n=5.

Dunque in questo metodo l'attenzione va posta principalmente sulla diversa procedura di discretizzazione: la seguente tabella, ripresa dall'Allegato A alla norma UNI EN ISO 52016, definisce le modalità di calcolo delle caratteristiche di ogni nodo necessarie alla successiva individuazione delle equazioni di bilancio termico.

Node number	Layer number	Node position	Areal thermal capacity $\kappa_{pli;eli}$ [J/m² K]	Internodes conductance $h_{pli;eli}$ [W/m² K]
1	-	external surface	0	$1/[(R_{c;1;eli}/Ncn_1)/2]$
2	1	internal	$\rho_1 \cdot c_1 \cdot (d_1/Ncn_1)$	$1/(R_{c;1;eli}/Ncn_1)$
...	...	...	...	...
$1 + Ncn_1$	1	internal	$\rho_1 \cdot c_1 \cdot (d_1/Ncn_1)$	$1/[(R_{c;1;eli}/Ncn_1)/2+ (R_{c;2;eli}/Ncn_2)/2]$
...	...	...	...	...
pli	$j-1$	internal	$\rho_{j-1} \cdot c_{j-1} \cdot (d_{j-1}/Ncn_{j-1})$	$1/[(R_{c;j-1;eli}/Ncn_{j-1})/2+ (R_{c;j;eli}/Ncn_j)/2]$
$pli + 1$	j	internal	$\rho_j \cdot c_j \cdot (d_j/Ncn_j)$	$1/(R_{c;j;eli}/Ncn_j)$
...	...	...	...	...
$pli + Ncn_j$	j	internal	$\rho_j \cdot c_j \cdot (d_j/Ncn_j)$	$1/[(R_{c;j;eli}/Ncn_j)/2+ (R_{c;j+1;eli}/Ncn_{j+1})/2]$
...	...	...	...	...
$pln\text{-}1 = \sum_{j=1}^{N} Ncn_j + 1$	N	internal	$\rho_N \cdot c_N \cdot (d_N/Ncn_N)$	$1/[(R_{c;N;eli}/Ncn_N)/2]$
$pln = \sum_{j=1}^{N} Ncn_j + 2$	-	internal surface	0	-

NOTE:

a. For the j-th layer the Fourier number is defined as $Fo_j = \Delta t \cdot \lambda_j/(\rho_j \cdot c_j)/d_j^2$.

b. The reference Fourier number (Fo_{ref}) is set at 0,5.

c. The number of capacity nodes in the j-the layer is calculated as:

$$Ncn_j = \max\left\{1; \left\lfloor \sqrt{Fo_{ref}/Fo_j} + 0,999999 \right\rfloor\right\}$$

d. The total number of capacity nodes is calculated as $\sum_{j=1}^{N} Ncn_j$

e. The number of nodes (pln) is equal to the total number of capacity nodes plus two.

f. ρ_j, c_j are respectively the mass density [kg/m³] and the thermal capacity by unit of mass [J/(kg K)] of the material of the j-th layer of the building element.

g. $R_{c;j;eli}$ is the conductive resistance [m² K/W] of j-th layer of the building element, calculated as d_j/λ_j where d_j is the layer thickness [m], and λ_j is the layer material thermal conductivity [W/(m K)].

h. $\Delta x_j = d_j/Ncn_j$ is the thickness [m] of the portion of layer associated to each capacity node in the j-th layer of the building element.

i. $\rho_j \cdot c_j \cdot \Delta x_j$ is the areal thermal capacity [J/m² K] associated to each capacity node in the j-th layer of the building element.

j. $R_{c;j;eli}/Ncn_j$ is the conductive resistance [m² K/W] of the portion of layer associated to each capacity node in the j-th layer of the building element, calculated as $\Delta x_j/\lambda_j$.

k. If an internal layer is an air gap, the areal thermal capacity $\kappa_{pli;eli}$ shall be zero and the internodes conductances are calculated as $h_{pli-1;eli} = h_{pli;eli} = h_a \cdot 2$, where h_a, in W/(m²K), is the convective-radiative air layer conductance.

Tabella 12: Tabella NA.10-bis UNI EN ISO 52016,metodo di assegnazione delle capacità termiche ai nodi.

Di seguitto è riportata la discretizzazione di ciascun elemento opaco secondo questo medoto.

Parete Tipo D : Elemento opaco in calcestruzzo privo di isolamento

Descrizione degli strati	Spessore (d) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Rc;j;eli [m2k/w]	Fo_j	arg funz parte intera	risultato_funz_parte intera	Ncnj	Δxj [m]	*K*pli;eli [J/m²K]
Aria esterna					0,0400						
Calcestruzzo	0,2100	1,6000	1000	2300	0,1313	0,0568	3,1312	3,0000	3	0,070	161000
Aria interna					0,1299						

ΣNcnj	3
pln	5

Tabella 13: Caratteristiche termofisiche e calcolo del numero dei nodi per la parete D

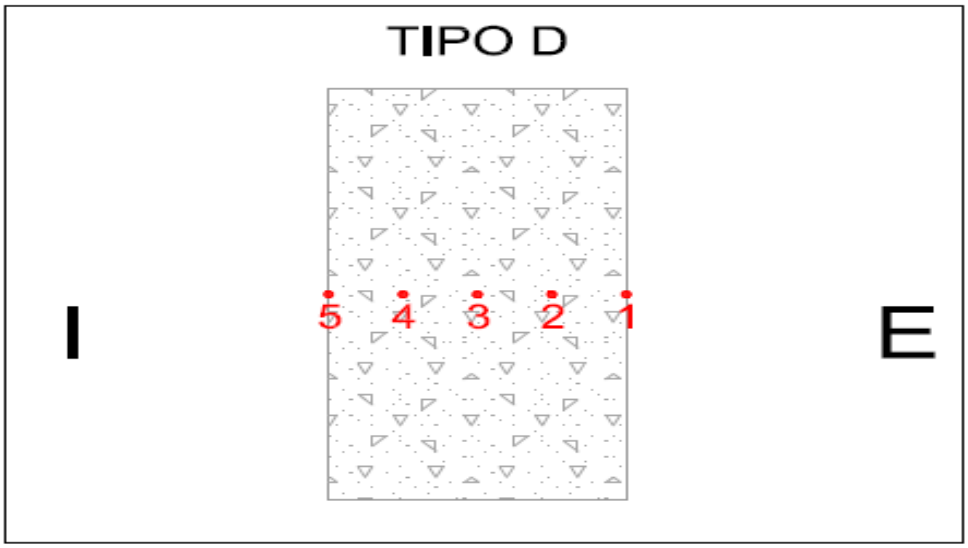

Figura 27: Discretizzazione parete D

nodi	*K*pli;eli [J/m²K]	*h*pli;eli [W/m²K]
1	0,0000	45,7143
2	161000,0000	22,8571
3	161000,0000	22,8571
4	161000,0000	45,7143
5	0,0000	0,0000

Tabella 13 : Valori di capacità termica e conduttanza assunti dai nodi della parete D

Parete Tipo I : Parete con cappotto esterno

Descrizione degli strati	Spessore (d) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Rc;j;eli [m2k/w]	Fo_j	arg funz parte intera	risultato_funz_parte intera	Ncnj	Δxj [m]	Kpli;eli [J/m²K]
Aria esterna					0,040						
Intonaco esterno	0,010	0,530	1000	1500	0,019	12,7200	1,0195	1,0000	1	0,0100	15000
Isolante	0,060	0,036	1450	20	1,667	1,2414	1,1844	1,0000	1	0,0600	1740
Muratura POROTON®	0,350	0,180	1000	750	1,944	0,0071	8,4789	8,0000	8	0,0438	32813
Intonaco interno	0,015	0,530	1000	1500	0,028	5,6533	1,0433	1,0000	1	0,0150	22500
Aria interna					0,130						

ΣNcnj	11
pIn	13

Tabella 14: Caratteristiche termofisiche e calcolo del numero dei nodi per la parete I

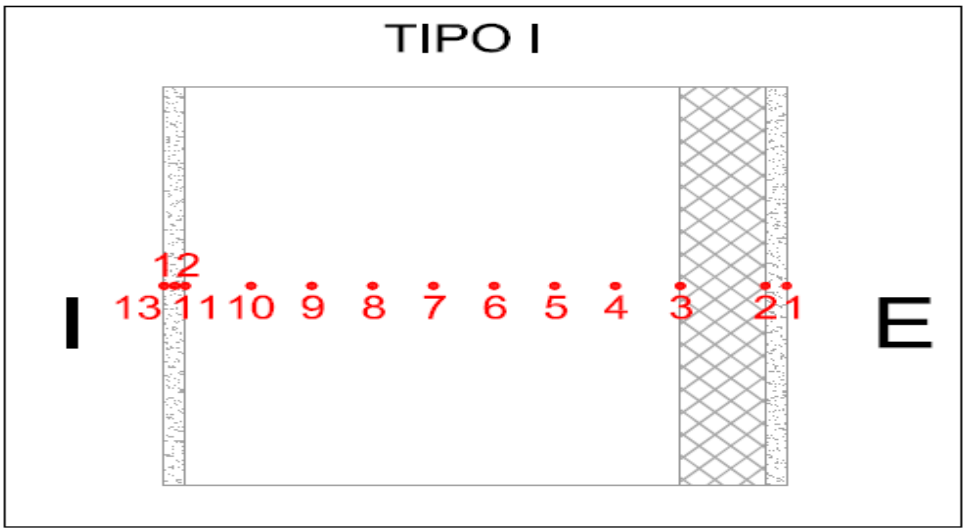

Figura 28 : Discretizzazione parete I

nodi	*K* pli;eli [J/m²K]	*h* pli;eli [W/m²K]
1	0	106
2	15000	1,186567164
3	1740	1,047272727
4	32812,5	4,114285714
5	32812,5	4,114285714
6	32812,5	4,114285714
7	32812,5	4,114285714
8	32812,5	4,114285714
9	32812,5	4,114285714
10	32812,5	4,114285714
11	32812,5	7,370352487
12	22500	70,66666667
13	0	0

Tabella 15: : Valori di capacità termica e conduttanza assunti dai nodi della parete I

Parete Tipo EI : parete con isolamento in intercapedine

Descrizione degli strati	Spessore (d) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Rc;j;eli [m²k/w]	Fo_j	arg funz parte intera	risultato_funz _parte intera	Ncnj	Δxj [m]	κpli;eli [J/m²K]
Aria esterna					0,040						
Intonaco esterno	0,015	0,530	1000	1500	0,028	5,6533	1,0433	1,0000	1	0,0150	22500
Tramezzo	0,120	0,200	1000	750	0,600	0,0667	2,9155	2,0000	2	0,0600	45000
Isolante	0,060	0,031	1450	20	1,935	1,0690	1,2115	1,0000	1	0,0600	1740
Tramezzo	0,120	0,200	1000	750	0,600	0,0667	2,9155	2,0000	2	0,0600	45000
Intonaco interno	0,015	0,530	1000	1500	0,028	5,6533	1,0433	1,0000	1	0,0150	22500
Aria interna					0,130						

ΣNcnj	7
pln	9

Tabella 16: Caratteristiche termofisiche e calcolo del numero dei nodi per la parete EI

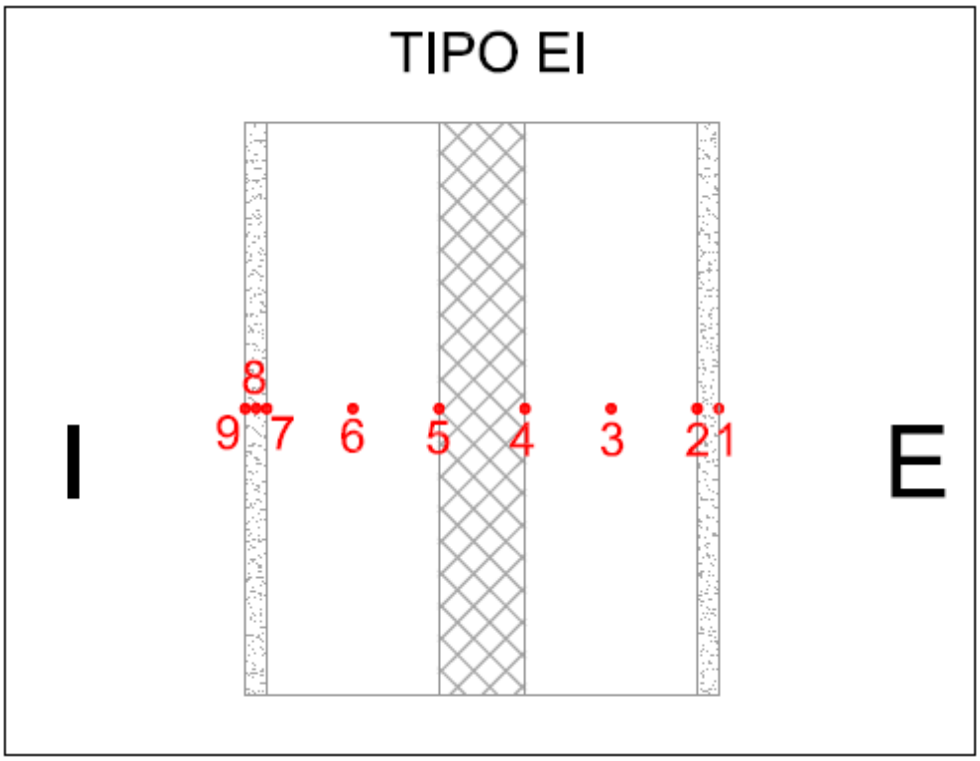

Figure 29: Discretizzazione parete EI

nodi	κpli;eli [J/m²K]	hpli;eli [W/m²K]
1	0	70,66666667
2	22500	6,091954023
3	45000	3,333333333
4	45000	0,894660895
5	1740	0,894660895
6	45000	3,333333333
7	45000	6,091954023
8	22500	70,66666667
9	0	0

Tabella 17: Valori di capacità termica e conduttanza assunti dai nodi della parete EI

Parete Tipo E : parete con isolamento interno

Descrizione degli strati	Spessore (d) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Rc;j;eli [m²k/w]	Fo_j	arg funz parte intera	risultato_funz_ parte intera	Ncnj	Δxj [m]	κpli;eli [J/m²K]
Aria esterna					0,040						
Intonaco esterno	0,0150	0,530	1000	1500	0,028	5,6533	1,0433	1,0000	1	0,0150	22500,0000
Muratura	0,3000	0,180	1000	750	1,667	0,0096	7,2858	7,0000	7	0,0429	32142,8571
Intonaco	0,0150	0,530	1000	1500	0,028	5,6533	1,0433	1,0000	1	0,0150	22500,0000
Isolante	0,0600	0,036	1450	20	1,667	1,2414	1,1844	1,0000	1	0,0600	1740,0000
Cartongesso	0,0125	0,210	1000	700	0,060	6,9120	1,0355	1,0000	1	0,0125	8750,0000
Aria interna					0,130						

ΣNcnj	11
pln	13

Tabella 18 : Caratteristiche termofisiche e calcolo del numero dei nodi per la parete E

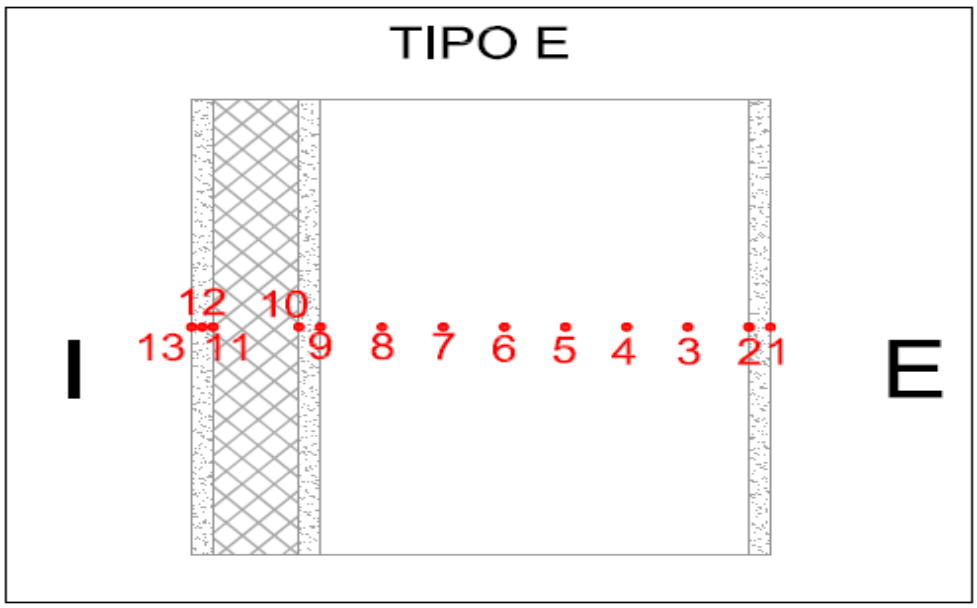

Figure 30: Discretizzazione parete E

nodi	$\kappa_{pli;eli}$ [J/mqK]	$h_{pli;eli}$ [W/mqK]
1	0	70,666667
2	22500	7,5075885
3	32142,86	4,2
4	32142,86	4,2
5	32142,86	4,2
6	32142,86	4,2
7	32142,86	4,2
8	32142,86	4,2
9	32142,86	7,5075885
10	22500	1,1799629
11	1740	1,1586207
12	8750	33,6
13	0	0

Tabella 19: Valori delle caratteristiche termofisiche assunti dai nodi della parete E

Parete Tipo M : parete isolata esternamente ed internamente

Descrizione degli strati	Spessore (d) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m³]	Rc;j;eli [m²k/w]	Fo_j	arg funz parte intera	risultato_funz_parte intera	Ncnj	Δxj [m]	Kpli;eli [J/m²K]
Aria esterna					0,040						
Intonaco esterno	0,015	0,530	1000	1500	0,028	5,6533	1,0433	1,0000	1	0,0150	22500
Isolamento EPS	0,064	0,032	1450	20	2,000	0,9698	1,2311	1,0000	1	0,0640	1856
Calcestruzzo	0,200	1,600	1000	2300	0,125	0,0626	2,9977	2,0000	2	0,1000	230000
Isolamento EPS	0,064	0,032	1450	20	2,000	0,9698	1,2311	1,0000	1	0,0640	1856
Intonaco interno	0,015	0,530	1000	1500	0,028	5,6533	1,0433	1,0000	1	0,0150	22500
Aria interna					0,130						

ΣNcnj	6
pIn	8

Tabella 20: Caratteristiche termofisiche e calcolo del numero dei nodi per la parete M

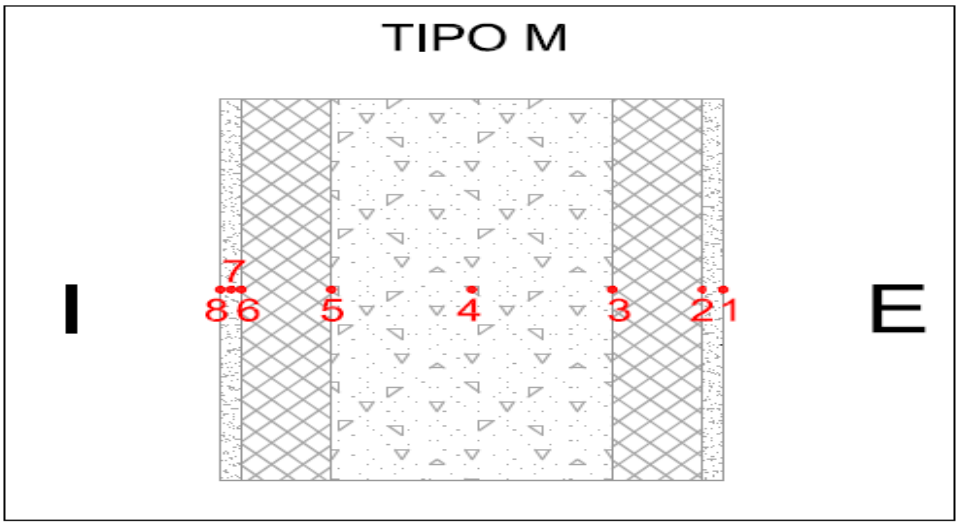

Figura 31: Discretizzazione parete M

nodi	$K_{pli;eli}$ [J/m²K]	$h_{pli;eli}$ [W/m²K]
1	0	70,66666667
2	22500	0,986046512
3	1856	0,96969697
4	230000	16
5	230000	0,96969697
6	1856	0,986046512
7	22500	70,66666667
8	0	0

Tabella 21: Valori delle caratteristiche termofisiche assunti dai nodi della parete E

5.4 Simulazione tramite il software Ansys fluent 19.2

ANSYS Fluent è un software che permette di modellare flussi di fluidi, scambi termici e di massa e sistemi in cui avvengono reazioni chimiche in geometrie piuttosto complesse utilizzando il metodo numerico dei volumi finiti .

La fluidodinamica computazionale è l'insieme di tutti i metodi di risoluzione dei problemi legati al moto dei fluidi che integrano numericamente i bilanci di materia,energia e quantità di moto.

Questi software risolvono i problemi fluidodinamici basandosi su griglie di calcolo che riproducono le caratteristiche del sistema studiato. Per arrivare a soluzioni precise i programmi CFD hanno bisogno di precise condizioni al contorno per ciascuna superficie descritta nel dominio. Ovviamente per ottenere risultati precisi per problemi di geometria complessa bisogna disporre di risorse computazionali elevate. Nella Figura sono elencate le fasi che compongono la realizzazione di una simulazione CFD:

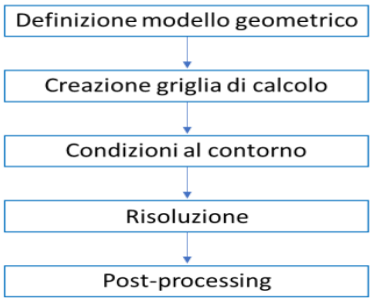

Figure 32: Struttura di una CFD

Ansys Fluent è attualmente uno dei software più diffusi in quanto può essere usato per modellizzare fenomeni di ogni tipo.

Ansys è dotato di un foglio di lavoro denominato workbench nel quale si può creare lo schema del proprio modello numerico. Come mostrato nella figura l'elenco presentato dal software rappresenta tutte le fasi di cui ha bisogno una simulazione CFD:

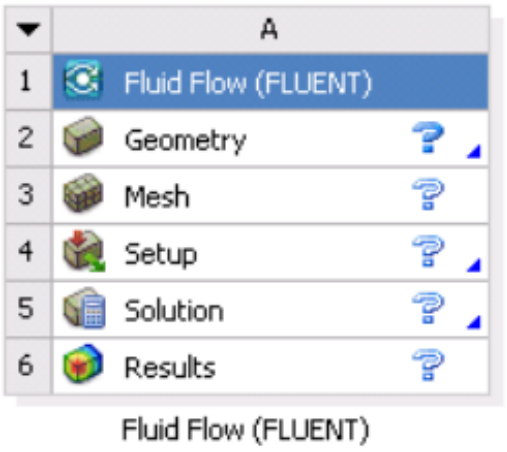

Figura 33: Fasi che compongono una simulazione CFD

Ad ogni fase è legato un sottoprogramma a cui si può accedere per definire il modello geometrico, la griglia di calcolo,le condizioni al contorno,soluzione e fase di post-processing dei risultati.

5.4.1 Modello Geometrico

Per la definizione del modello geometrico è stato utilizzato DesignModeler.Nella definizione del modello 2D è stata posta attenzione nella definizione dei vari strati che compongono l'elemento opaco oggetto di studio. Di seguito,a titolo di esempio viene riportato il modello geometrico di riferimento per la parete di tipo I:

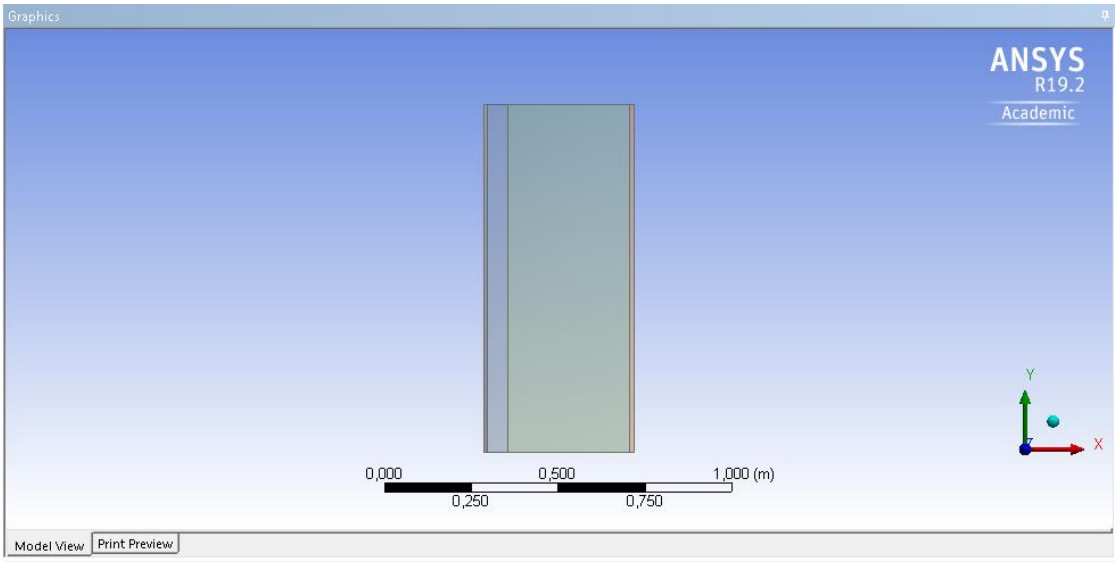

Figura 34: Modello geometrico della parete I

5.4.2 Discretizzazione del modello: Meshing

La scelta della mesh è fondamentale, poiché, più è alto il numero di nodi, più ci si avvicina ad una descrizione continua dello spazio, in modo tale da avere una soluzione più accurata riducendo gli errori di approssimazione e mantenendo dei tempi di calcolo accettabili. All'aumentare della mesh, però, aumenta il costo computazionale poiché aumenta il tempo di calcolo. È dunque fondamentale trovare un compromesso tra l'accuratezza e la qualità complessiva della simulazione fluidodinamica e il costo computazionale. La costruzione della mesh è stata effettuata tramite il tool installato nel pacchetto ANSYS, dove è possibile modellare in maniera differente le varie regioni impostando i parametri di interesse.

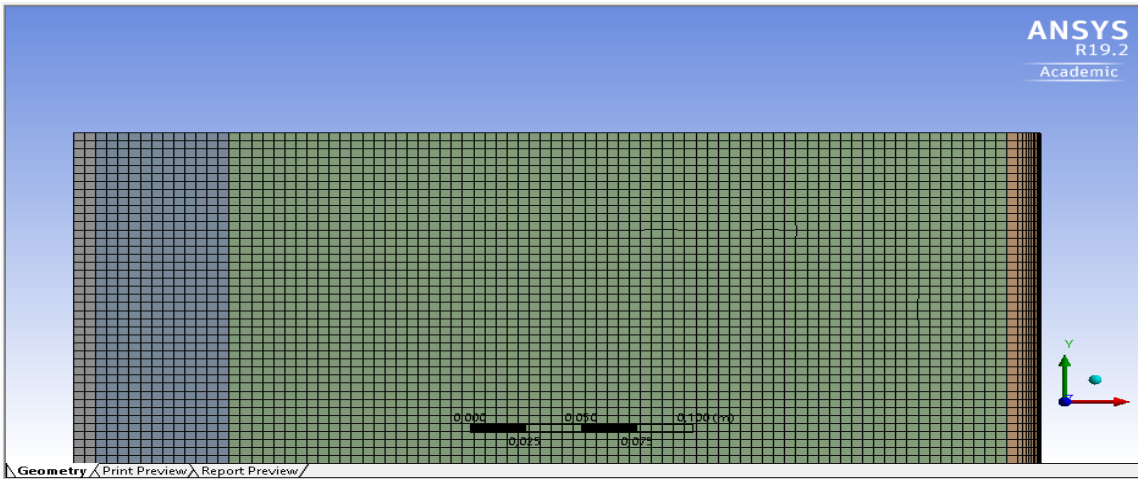

Figura35: Griglia di calcolo o Mesh per la parete I

5.4.3 Condizioni al contorno -Setup

Nel setup di Fluent oltre ad impostare tutte le proprietà dei solidi e dei fluidi si impostano le condizioni al contorno che permettono così di definire il problema. Per ogni elemento opaco analizzato è stata quindi fissata:

- una superficie esterna, del tipo wall, che delimita l'elemento opaco dall'ambiente esterno;
- una superficie interna, del tipo wall, che delimita l'elemento opaco dall'ambiente interno;
- due superfici adiabatiche, del tipo wall, che delimitano superiormente e inferiormente l'elemento opaco;
- una o più interfacce, del tipo interface, in corrispondenza delle superfici che delimitano stratigrafie diverse;
- una o più superfici interne, del tipo interior, che caratterizzano l'interno delle varie stratigrafie.

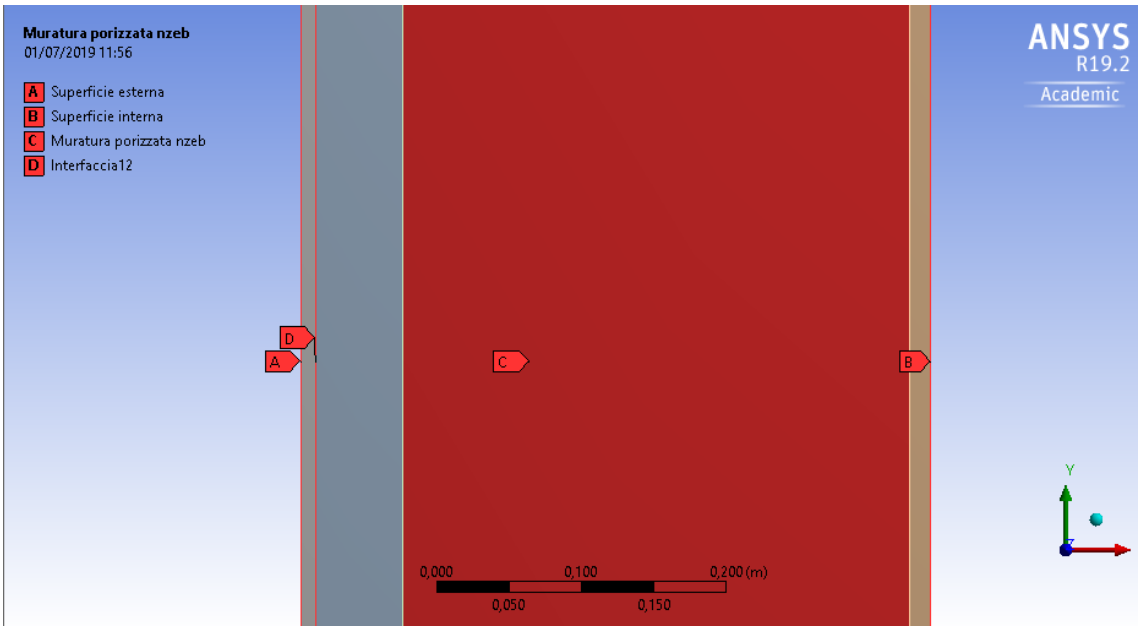

Figura 36: Definizione delle condizioni al contorno per la parete I

Quando vengono risolte le equazioni dell'energia,occorre definire le condizioni al contorno termiche. Nel presente caso di studio come anticipatamente esposto, il fenomeno di propagazione del calore è governato dalla conduzione(nello spessore della parete) e da convezione e conduzione in corrispondenza delle superfici esterna ed interna.

Per poter ricreare le condizioni ambientali descritte nel capitolo 3, si è dovuti ricorrere alla compilazione di due UDF(User Defined Function),ossia di funzioni che possono essere caricate in

Fluent per descrivere particolari condizioni al contorno. Le UDF sono scritte in linguaggio C utilizzando qualsiasi editor di testi che permetta di salvare in estensione .c .

Di seguito vengono riportati gli UDF per i casi analizzati:

- temperatura esterna cosinusoidale
- temperatura interna di 80°C per 3 ore

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(unsteady_temperaturacosinusoidale, thread, position)
{
   face_t f;
   real t = CURRENT_TIME;
   begin_f_loop(f, thread)
     {
       F_PROFILE(f, thread, position) = 10.0*cos(t/3600*0.2617)+273.15;
     }
   end_f_loop(f, thread)
}
```

Figura 37: Codice per la definizione dell' Udf di temperatura cosinusoidale esterna

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(unsteady_temperatura80, thread, position)
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;
    begin_f_loop(f, thread)

{
 if(CURRENT_TIME < 7200)
F_PROFILE(f, thread, position) =0.0+273.15;
else if(CURRENT_TIME <=18000 && CURRENT_TIME >=7200)
F_PROFILE(f, thread, position) =80.0+273.15;
else
F_PROFILE(f, thread, position) =0.0+273.15;

 }
    end_f_loop(f, thread)
}
```

Figura 38: Codice per la definizione dell'Udf di temperatura interna di 80°C per 3 h

Una volta caricati,tramite il pannello "Interpreted UDFs", è possibile selezionare i profili di temperatura definiti dagli UDF dai menù a tendina delle condizioni al contorno .

5.4.4 Settaggio della soluzione e run della simulazione

L'ultima fase prima della vera e propria simulazione consiste nello specificare i vari parametri associati al metodo di soluzione.Inoltre è possibile specificare quali saranno le grandezze di interesse da visualizzare(sul monitor) o da salvare su file excel. Per il caso in esame i report sono:

- flusso interno ed esterno
- temperatura superficiale interna ed esterna

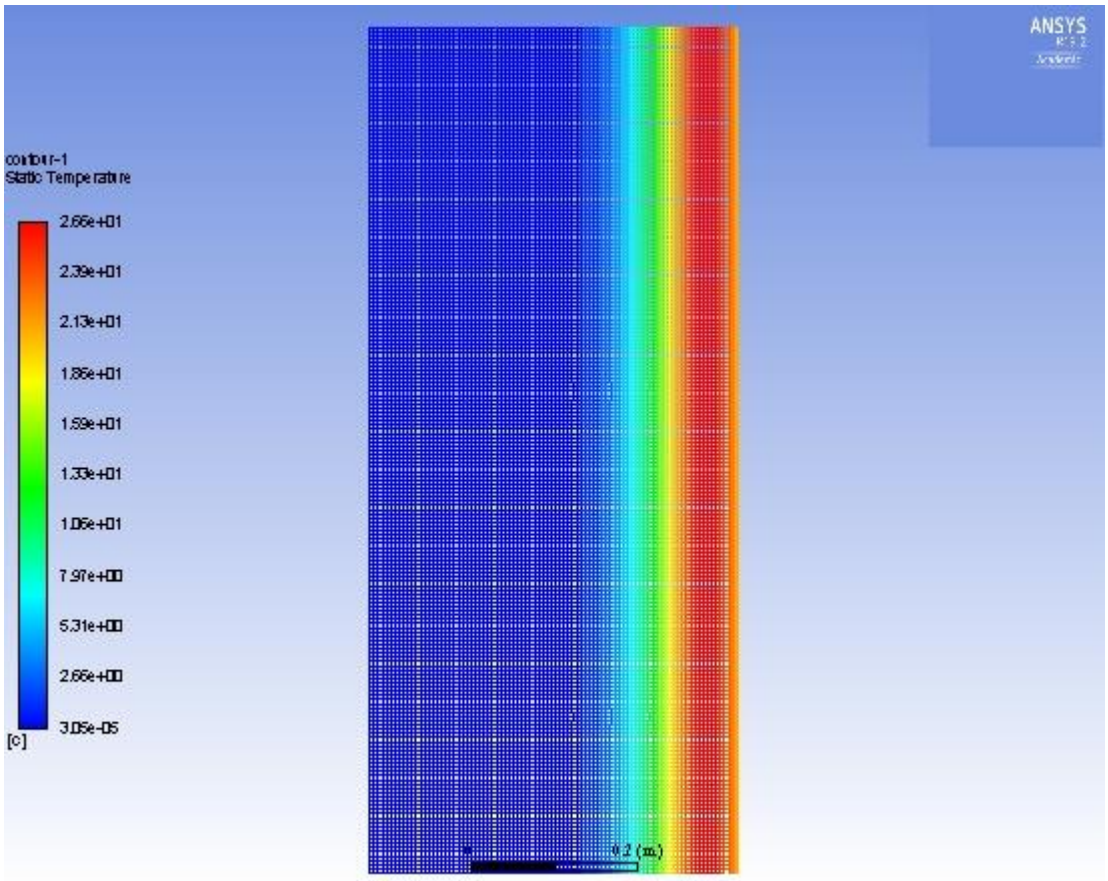

Figure 34 : Campo di temperatura della soluzione numerica del modello di parete I

6. Risultati ottenuti sugli elementi opachi con i vari metodi utilizzati

Lo studio prevede un primo confronto dei vari metodi descritti in precedenza,al fine di valutare l'accuratezza dei risultati ottenuti nel caso di ogni singolo elemento opaco oggetto di studio.

Come precedentemente anticipato, sono state fissate due tipi di condizioni al contorno:

- temperatura ambiente esterna con andamento cosinusoidale con periodo di 24 h;
- temperatura ambiente interna di 80°C per una durata di 3 h.

Ricordiamo che, in entrambi i casi, la temperatura ambiente interna (1° caso) e quella esterna(2°caso) è stata fissata a 0°C.

Gli scenari appena descritti sono stati riproposti per le 5 pareti presentate nel capitolo 4, caratterizzate da stratigrafie e proprietà termofisiche differenti, concentrando l'attenzione sui valori di temperatura superficiale(interna ed esterna) e i valori di flusso termico(interno ed esterno).

Considerato il fenomeno termico analizzato e le finalità delle strategie di controllo che ne derivano , è stata posta maggiore attenzione ai risultati relativi alla superficie interna(densità di flusso termico interno),di cui di seguito verranno riportati i grafici e i relativi errori.

6.1 Risultati con temperatura periodica cosinusoidale

Il primo gruppo di confronti ha riguardato la condizione al contorno (temperatura ambiente esterna) definita da una funzione di tipo cosinusoidale.

Solamente in questo gruppo di confronti al fine di ottenere dei risultati stabilizzati tra i vari periodi, pur avendo a disposizione i risultati di un'analisi svolta su un intervallo temporale di 4 giorni, sono stati estrapolati i valori numerici relativi all'ultimo periodo analizzato, cioè l'ultimo giorno.

Solo per questo caso, considerata la condizione al contorno di tipo armonico, è stato possibile individuare la soluzione analitica al problema della conduzione monodimensionale in regime dinamico attraverso il metodo descritto nella norma UNI EN ISO 13786.

L' accuratezza delle soluzioni derivanti dall'utilizzo dei vari metodi ,precedentemente esposti,è stata dunque valutata attraverso i seguenti errori:

- errore percentuale sull'ampiezza del picco di flusso,calcolato come $|(\text{Ø}_{max,analitica} - \text{Ø}_{max,numerica})|/\text{Ø}_{max,analitica}$
- errore percentuale sullo sfasamento del picco di flusso, calcolato come $(t_{max,analitica} - t_{max,numerica})/T$, con T uguale al periodo della forzante esterna (24 h)

con numerica si intende la soluzione derivante dal software Fluent e da ciascuno dei due metodi riportati nella norma UNI EN ISO 52016, con analitica la soluzione del metodo riportato nella norma UNI EN ISO 13786.

I valori massimi dei suddetti errori sono sono stati riportati nelle seguenti tabelle, individuando perciò gli errori in funzione dei diversi elementi opachi analizzati e dei vari metodi utilizzati.

Errore percentuale sull'ampiezza del picco di flusso interno			
	Ansys Fluent	UNI EN ISO 52016 Allegato A (num. nodi variabili)	UNI EN ISO 52016 Allegato B (5 nodi)
Parete D	0,8%	15,5%	26,3%
Parete I	0,9%	25,6%	939,3%
Parete EI	2,3%	29,6%	168,9%
Parete E	7,1%	25,5%	1272,0%
Parete M	18.8%	6,1%	94,7%

Tabella 22: Errori percentuali rispetto alla soluzione analitica

Errore percentuale sullo sfasamento del picco di flusso interno			
	Ansys Fluent	UNI EN ISO 52016 Allegato A (num. nodi variabili)	UNI EN ISO 52016 Allegato B (5 nodi)
Parete D	0,00%	4,17%	4,17%
Parete I	0,00%	8,33%	-41,67
Parete EI	0,00%	4,17%	-62,50%
Parete E	0,00%	4,17%	-41,67%
Parete M	0,00%	4,17%	20,83%

Tabella 23: Errori percentuali sullo sfasamento del picco di flusso interno

Da un'analisi dei risultati ottenuti, si evince che le soluzioni ottenute con il software di simulazione CFD Fluent sono generalmente più accurate rispetto agli altri metodi analizzati: in termini di ampiezza del picco di flusso massimo si registra un errore massimo del 7,1%, tranne il caso anomalo della parete M (errore del 18,8%).

In termini di sfasamento, in tutti i casi analizzati, Fluent restituisce uno sfasamento nullo rispetto alla soluzione analitica fornita dalla UNI EN ISO 13786.

Il metodo di discretizzazione dell'elemento opaco per mezzo di un numero di nodi variabile,cioè quello riportato nell'allegato A alla norma UNI EN ISO 52016,risulta anch'esso piuttosto affidabile,riscontrando però errori di maggiore entità ,che raggiungono ,come nel caso della parete EI dotata di isolamento ad intercapedine, valori che sfiorano il 30%.

Lo sfasamento invece risulta minimo:in tutti i casi analizzati si attesta al 4,17%,tranne il caso della parete I(8,33%).

Il metodo di discretizzazione tramite un numero di nodi fissi risulta invece di gran lunga più problematico: in termini di ampiezza del picco di flusso gli errori risultano enormi rispetto alla soluzione analitica,una su tutti la parete E con un errore del 1272%.

L'errore sullo sfasamento anch'esso risulta rilevante:si arriva ad errori del 62,50% per la parete EI con isolamento ad intercapedine.

Di seguito si riportano i grafici delle densità di flusso interno dei 5 elementi opachi ottenuti con i diversi metodi disponibili per questa tipologia di condizione al contorno cosinusoidale.

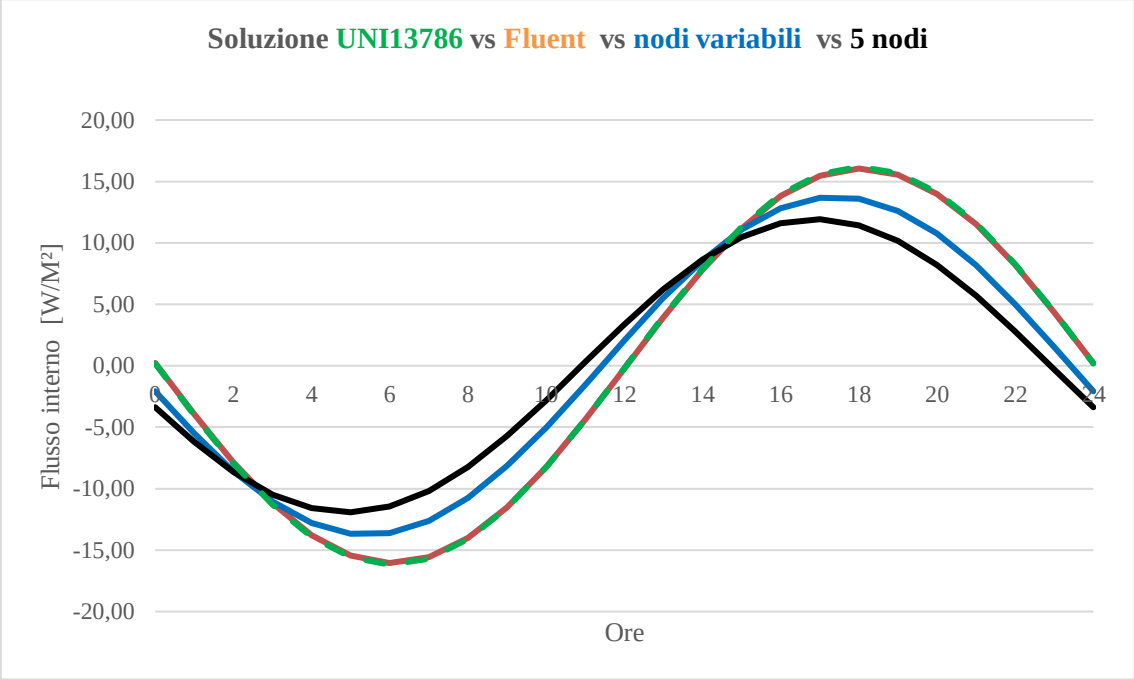

Figura 40: Andamenti dei flussi interni al variare del metodo per la parete D

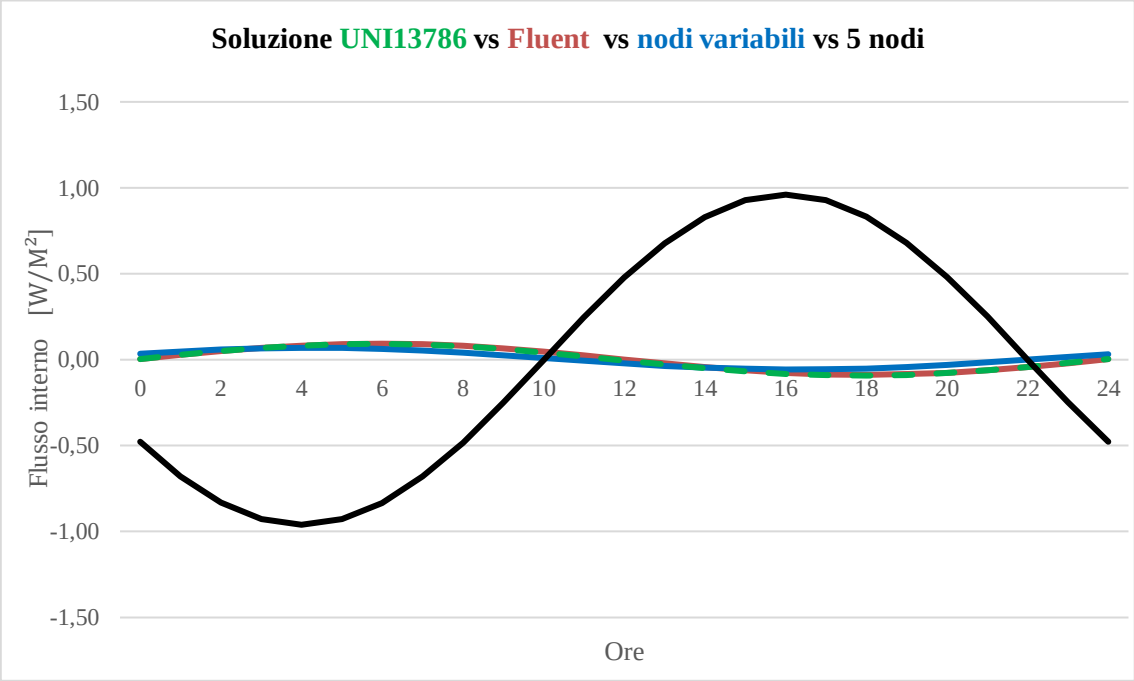

Figura 11: Andamenti dei flussi interni al variare del metodo per la parete I

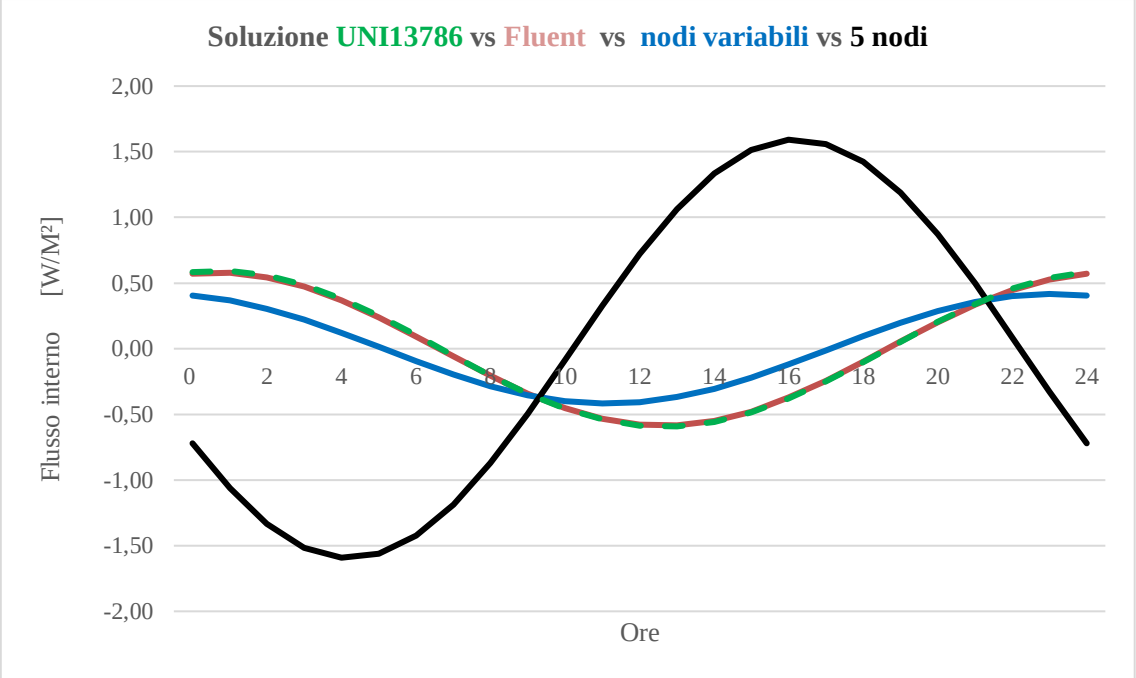

Figura 42: Andamenti dei flussi interni al variare del metodo per la parete EI

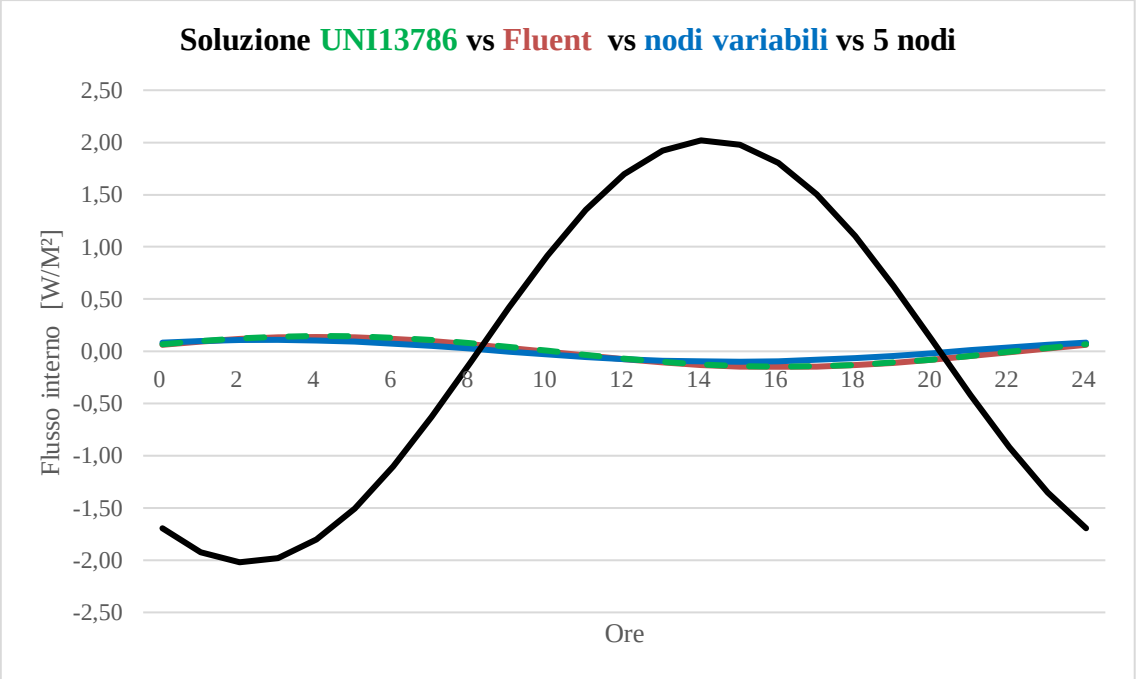

Figura 43: Andamenti dei flussi interni al variare del metodo per la parete E

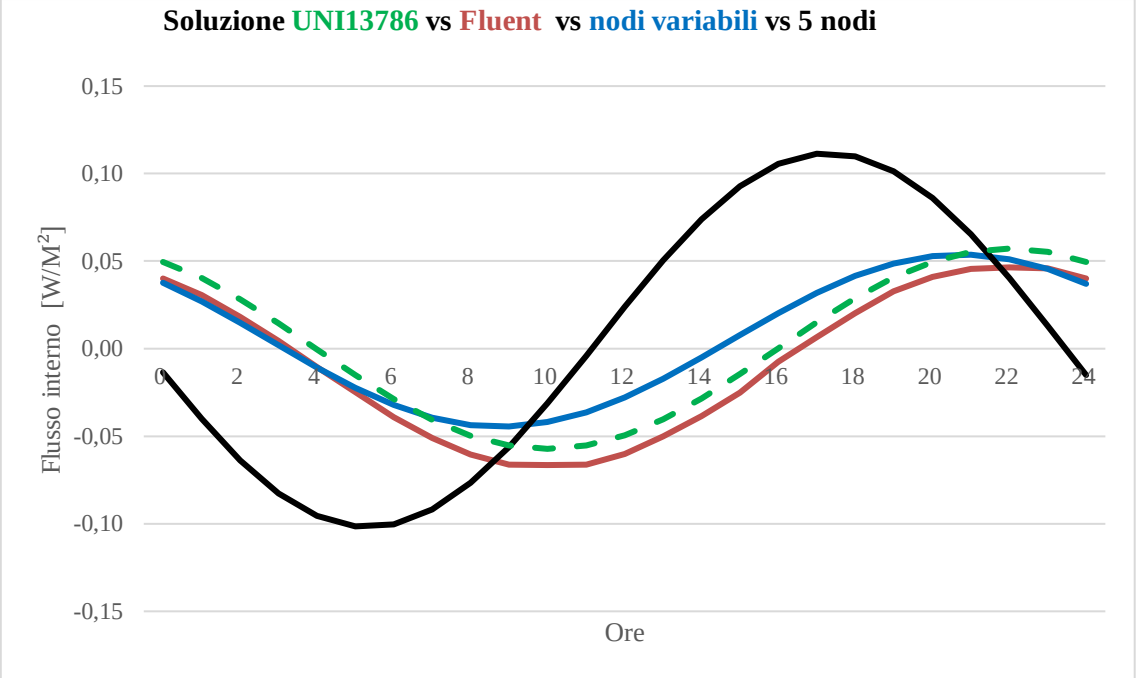

Figura 44: Andamenti dei flussi interni al variare del metodo per la parete M

Accertata l'affidabilità del software Fluent, si è proceduto al confronto delle temperature superficiali interne ed esterne. Sono state quindi confrontate le soluzioni delle UNI EN ISO 52016 con quelle di Fluent in termini di errore normalizzato sulle massime temperature superficiali, interna ed esterna:

- $(\theta_{fluent}^{max,se} - \theta_{num}^{max,se})/\Delta\,\theta$ [%]
- $(\theta_{fluent}^{max,si} - \theta_{num}^{max,si})/\Delta\,\theta$ [%]

dove se e si inicano la superficie esterna e la superficie interna; $\Delta\,\theta$ è pari a 10,ampiezza della forzante.

Errore normalizzato sul massimo delle temperature superficiali esterne rispetto al software Fluent		
	UNI EN ISO 52016 Allegato A (num. nodi variabili)	UNI EN ISO 52016 Allegato B (5 nodi)
Parete D	0,68%	-15,80%
Parete I	0,47%	-1,34%
Parete EI	0,75%	-0,02%
Parete E	0,80%	14,26%
Parete M	0,73%	-0,74%

Tabella 24 : Percentuali di errore rispetto a Fluent sulle massime temperature superficiali esterne

Errore normalizzato sul massimo delle temperature superficiali interne rispetto al software Fluent		
	UNI EN ISO 52016 Allegato A (num. nodi variabili)	UNI EN ISO 52016 Allegato B (5 nodi)
Parete D	3,12%	5,39%
Parete I	0,03%	-1,13%
Parete EI	0,22%	-1,31%
Parete E	0,06%	-2,43%
Parete M	0,03%	-0,05%

Tabella 25: Percentuali di errore rispetto a Fluent sulle massime temperature superficiali interne

I risultati restituiscono errori minimi con il metodo a nodi variabili(3,2% errore massimo per la temperatura superficiale esterna, 1,45% per quella interna); con il metodo a nodi fissi invece si riscontrano errori di entità maggiore (5,39% errore massimo per la temperatura superficiale interna, 15,80% per quella esterna).Di seguito sono riportati gli andamenti delle temperature superficiali esterne ed interne per i 5 elementi opachi analizzati.

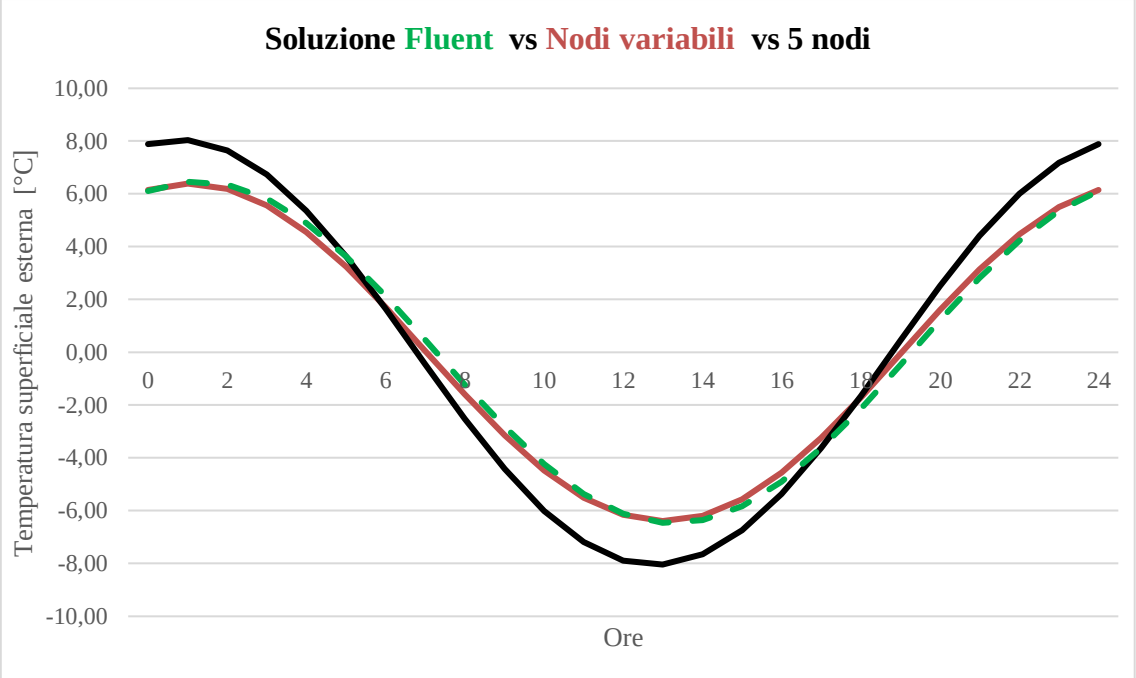

Figura 45: Andamento della temperatura superficiale esterna al variare del metodo per la parete D

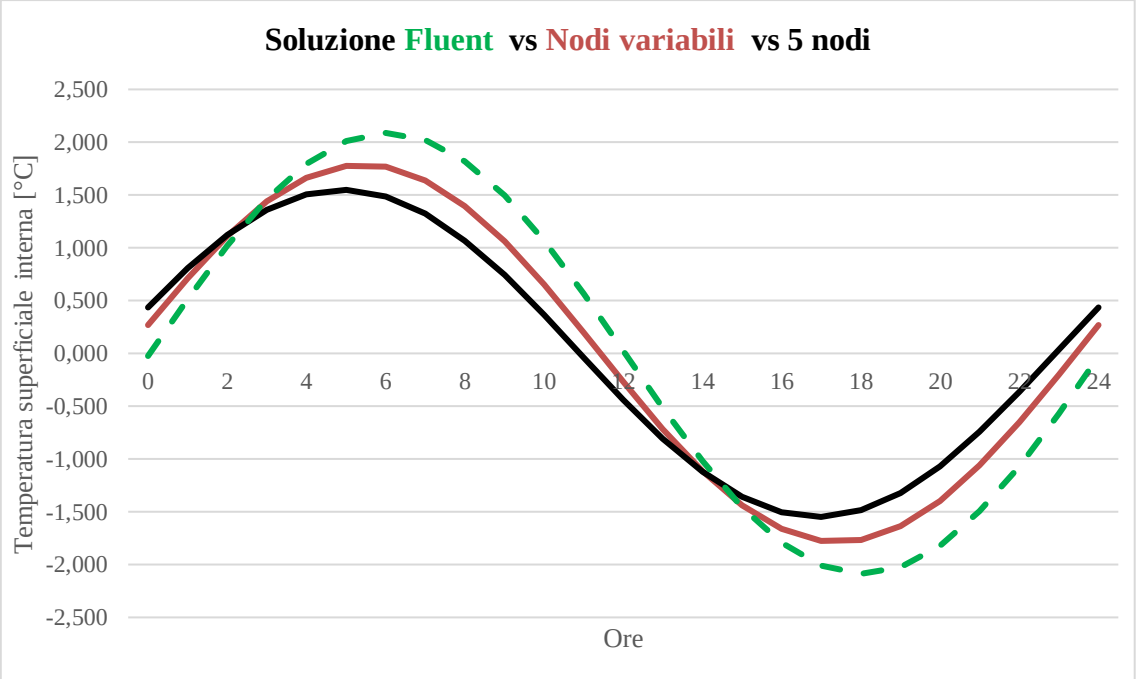

Figura 46: Andamento della temperatura superficiale interna al variare del metodo per la parete D

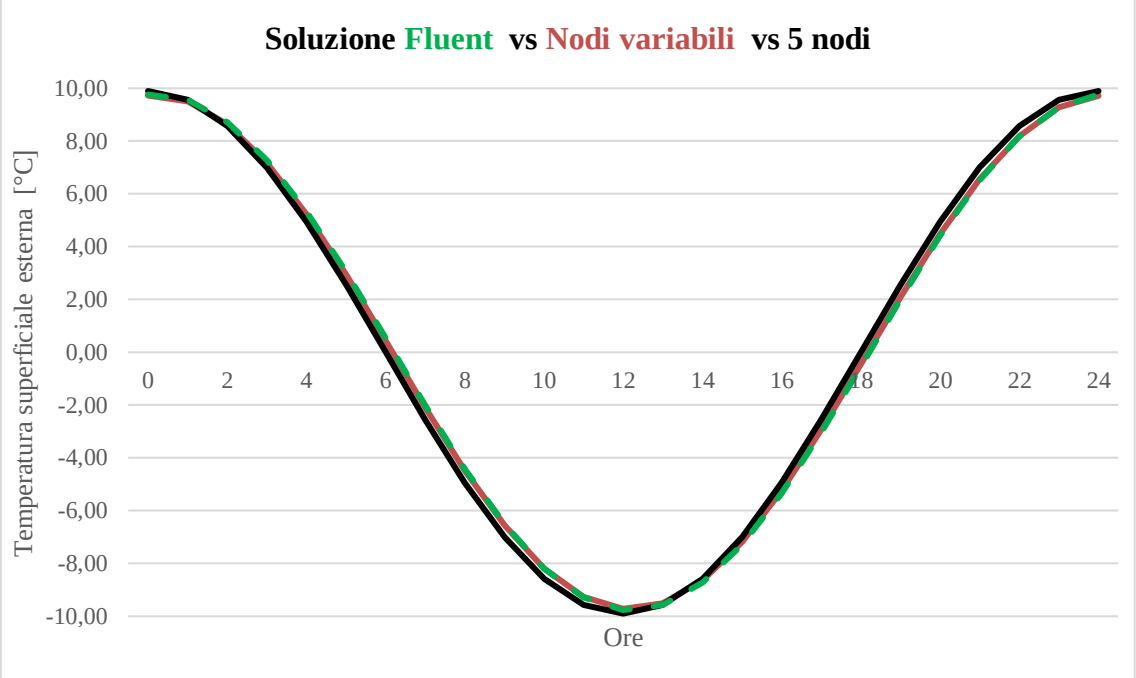

Figura 47: Andamento della temperatura superficiale esterna al variare del metodo per la parete I

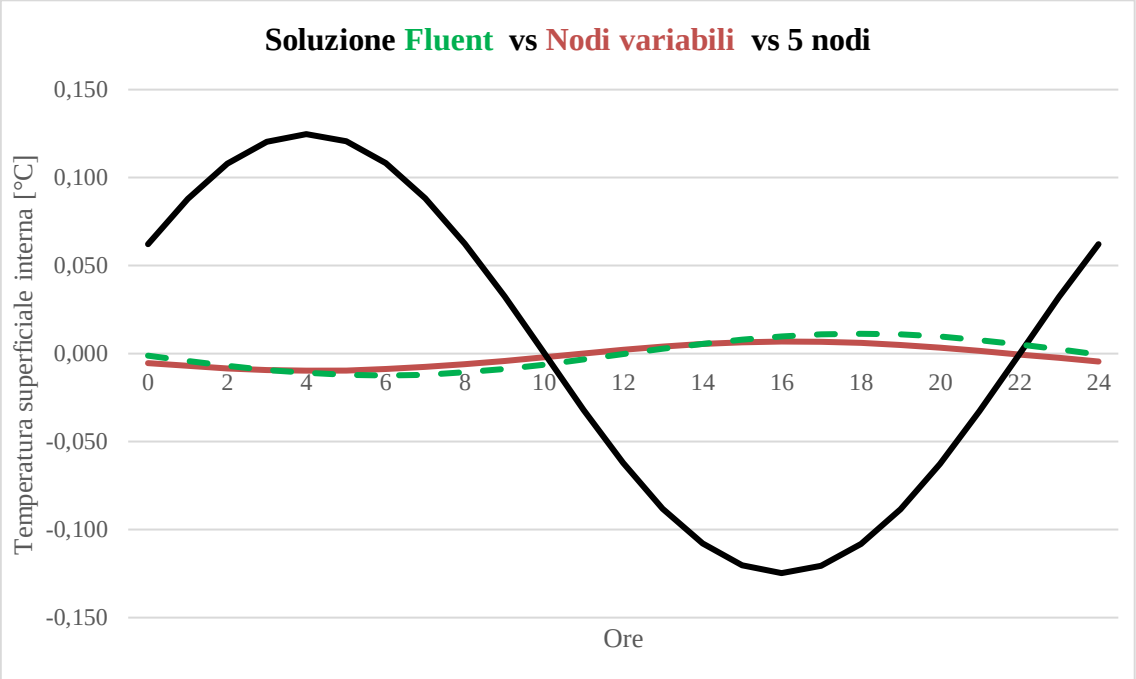

Figura 48: Andamento della temperatura superficiale interna al variare del metodo per la parete I

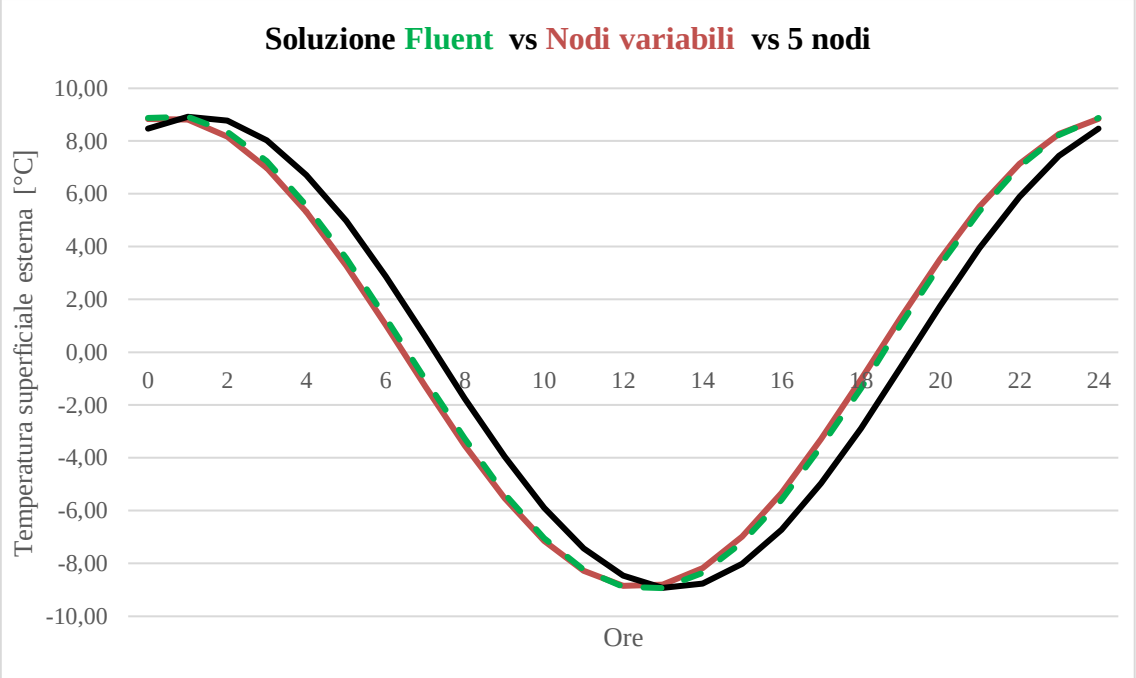

Figura 49: Andamento della temperatura superficiale esterna al variare del metodo per la parete EI

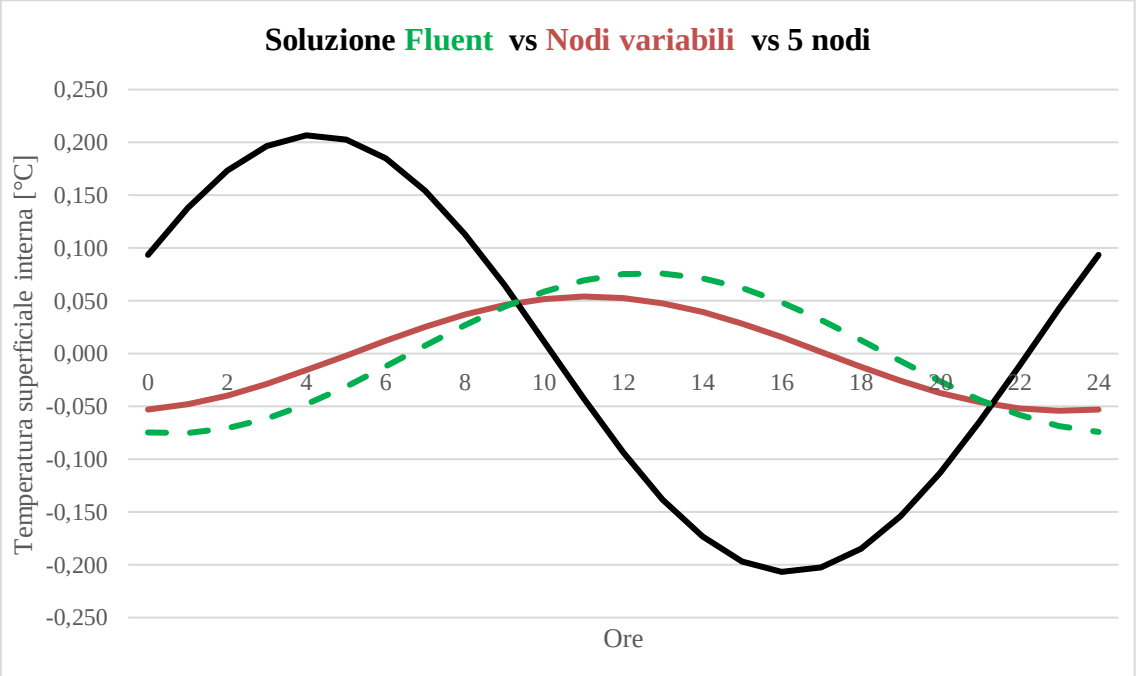

Figura 50: Andamento della temperatura superficiale interna al variare del metodo per la parete EI

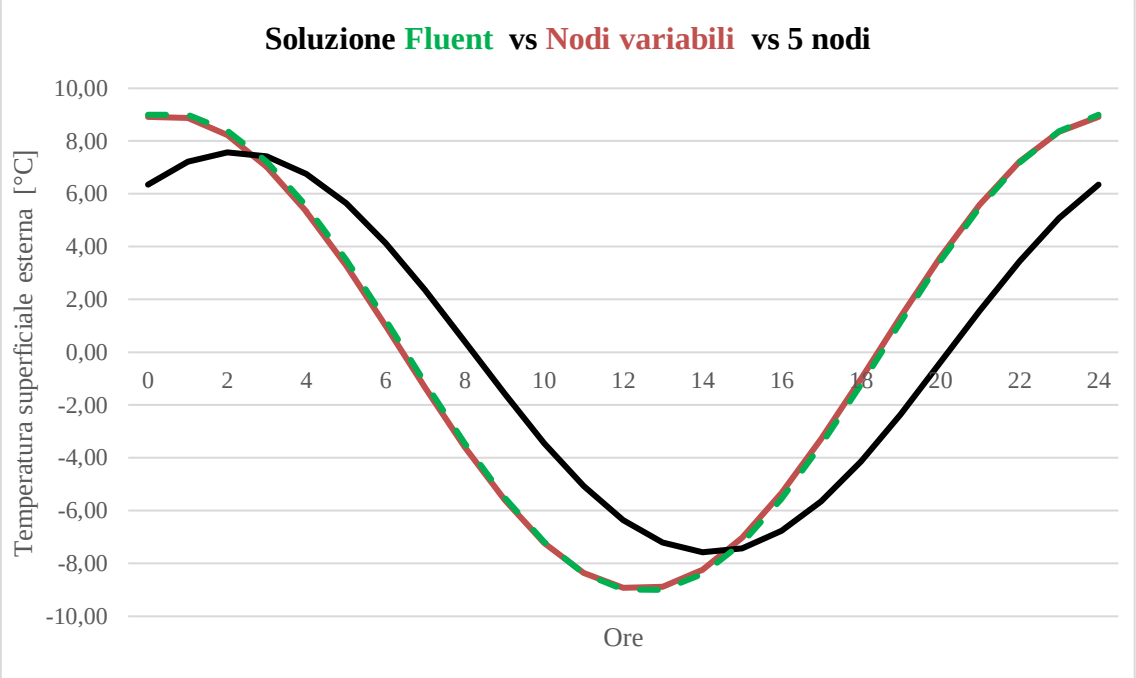

Figura 51: Andamento della temperatura superficiale esterna al variare del metodo per la parete E

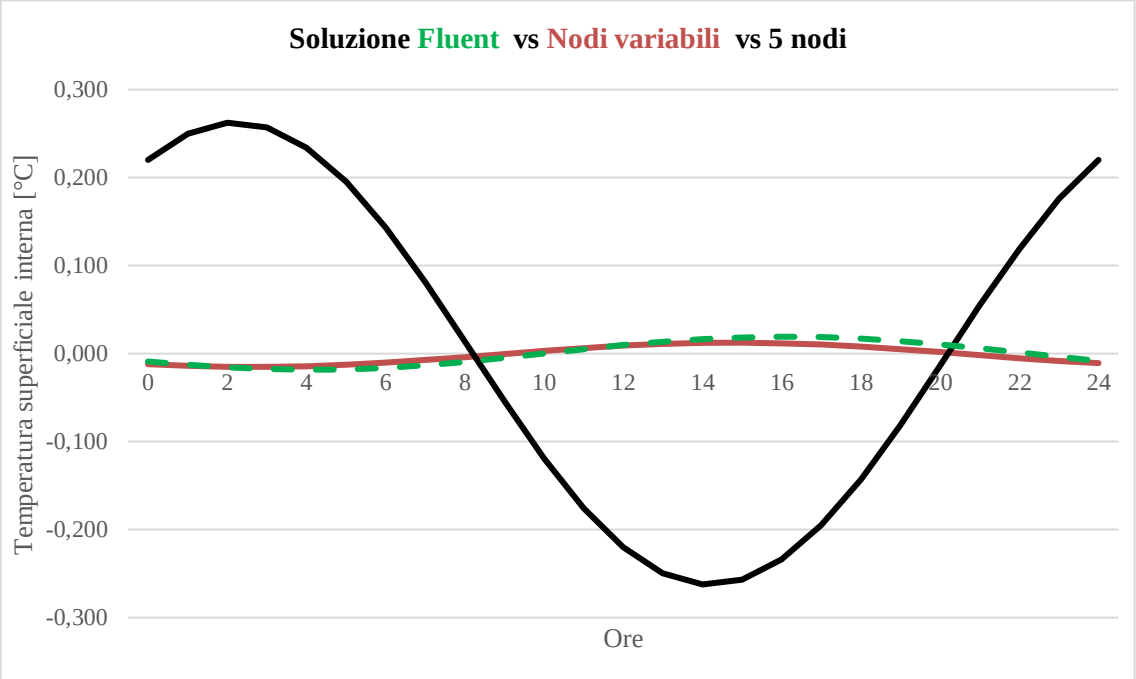

Figura 52: Andamento della temperatura superficiale interna al variare del metodo per la parete E

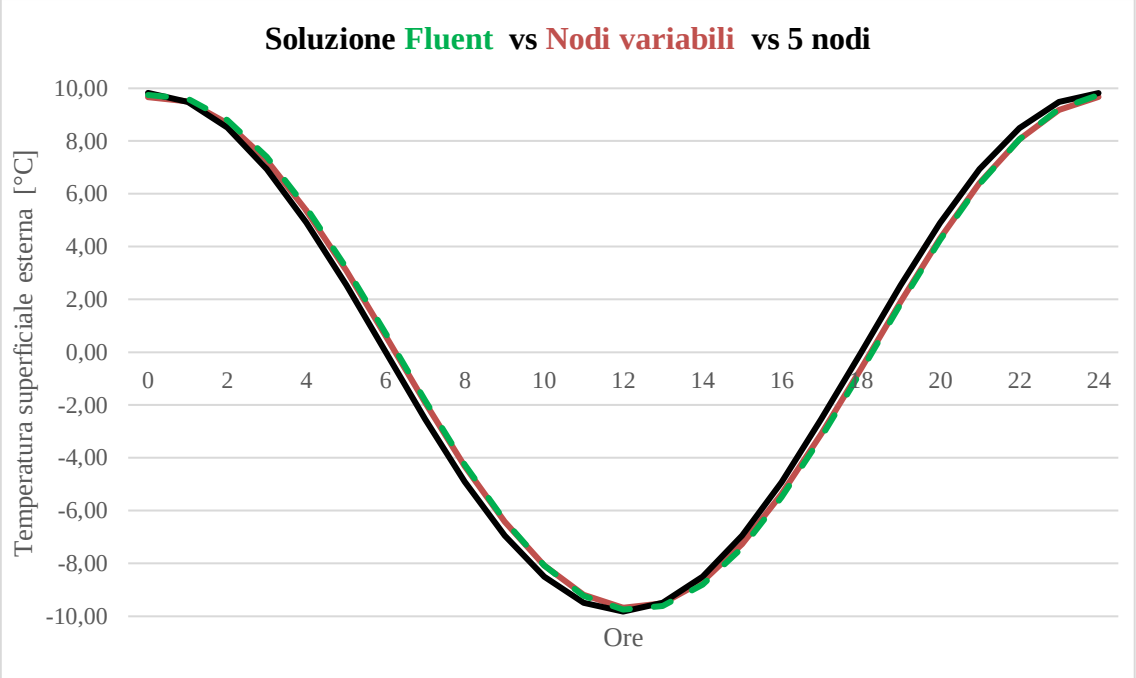

Figura 53: Andamento della temperatura superficiale esterna al variare del metodo per la parete M

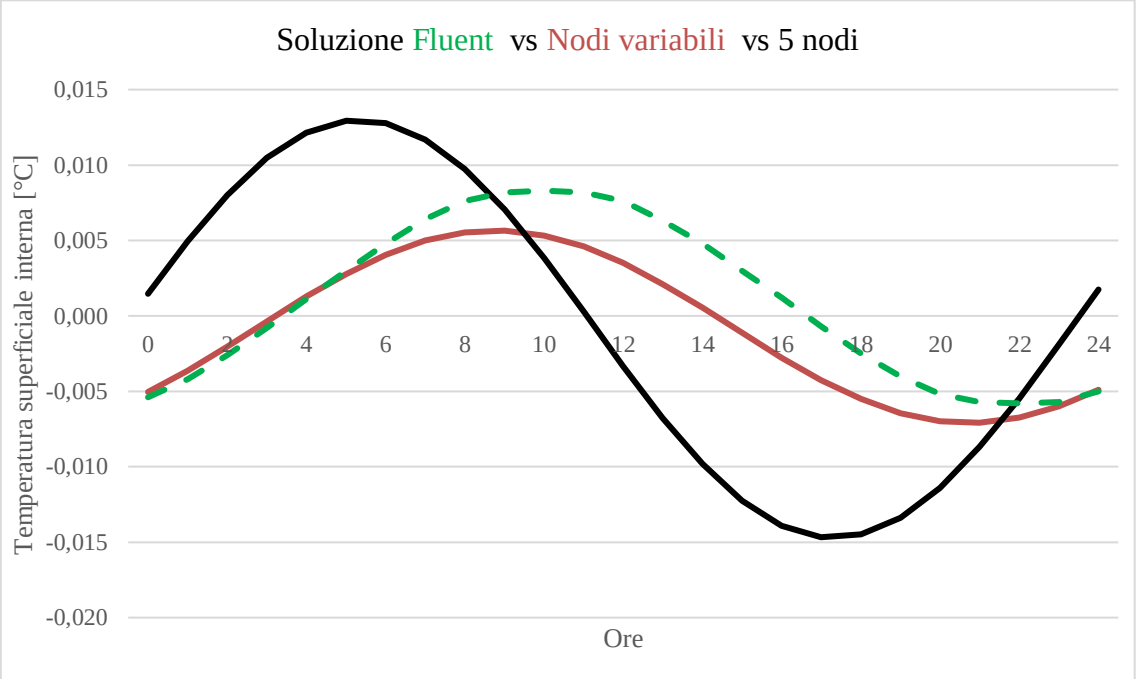

Figure 54: Andamento della temperatura superficiale interna al variare del metodo per la parete M

6.2 Risultati con temperatura ambiente interna di 80°C per una durata di 3 ore

Il secondo gruppo di confronti ha riguardato la condizione al contorno definita nel capitolo 3,ossia una temperatura ambiente interna di 80°C per una durata di 3 ore,più precisamente dalla seconda alla quinta ora,le restanti ore 0°C.

La temperatura ambiente esterna,invece, è stata mantenuta a 0°C.

In questo secondo caso non è stato possibile disporre delle soluzioni analitiche fornite dalla UNI EN ISO 13786,non essendoci un andamento delle condizioni al contorno di tipo cosinusoidali.

Le soluzioni fornite dalle UNI EN ISO 52016 sono state quindi confrontate con quelle del software Ansys Fluent.

Nello specifico l'errore è stato valutato in termini di:

- errore percentuale sull'ampiezza del picco di flusso calcolato come
  $|(\text{Ø}_{max,Fluent} - \text{Ø}_{max,numerica})|/\text{Ø}_{max,Fluent}$

- errore percentuale sul picco di temperatura superficiale interna calcolato come
  $|(T_{max,Fluent} - T_{max,numerica})|/T_{max,Fluent}$

Errore percentuale sull'ampiezza del picco di flusso interno		
	UNI EN ISO 52016 Allegato A (num. nodi variabili)	UNI EN ISO 52016 Allegato B (5 nodi)
Parete D	19%	24,7%
Parete I	40,2%	2%
Parete EI	39,8%	9,5%
Parete E	64,6 %	95,5%
Parete M	51%	94%

Tabella 26: Errore percentuale sul picco di flusso interno rispetto al software Fluent

Errore percentuale sulla massima temperatura superficiale interna		
	UNI EN ISO 52016 Allegato A (num. nodi variabili)	UNI EN ISO 52016 Allegato B (5 nodi)
Parete D	7,6%	58,9%
Parete I	2,3%	52,3%
Parete EI	3,3%	22,9%
Parete E	0,3%	3,2%
Parete M	1,4%	3,2

Tabella 27: Errore percentuale sul picco di temperatura superficiale interna rispetto al software Fluent

Anche in questo caso i risultati ottenuti con il metodo a nodi variabili risultano nel complesso migliori rispetto al metodo a 5 nodi fissi.

Nello specifico,analizzando gli errori sul picco di flusso interno,si riscontrano percentuali d'errore consistenti per entrambi i metodi,constatando però valori più alti(maggiori del 90%) per quello a nodi fissi.

I risultati in termini di temperatura superficiale interna risultano invece molto più accurati per il metodo a nodi variabili: l'errore massimo rispetto a Fluent è del 7,6% contro il 58,9% del metodo a nodi fissi.

Gli sfasamenti,sia in termini di picco di flusso interno che di temperatura,risultano in generale nulli per entrambi i metodi, ad eccezione della parete M ed E ,in cui si registra una sfasamento di 3 ore per il metodo a nodi fissi.

Di seguito vengono riportati i grafici degli andamenti di flusso interno e temperatura superficiale interna per ognuna delle pareti opache analizzate.

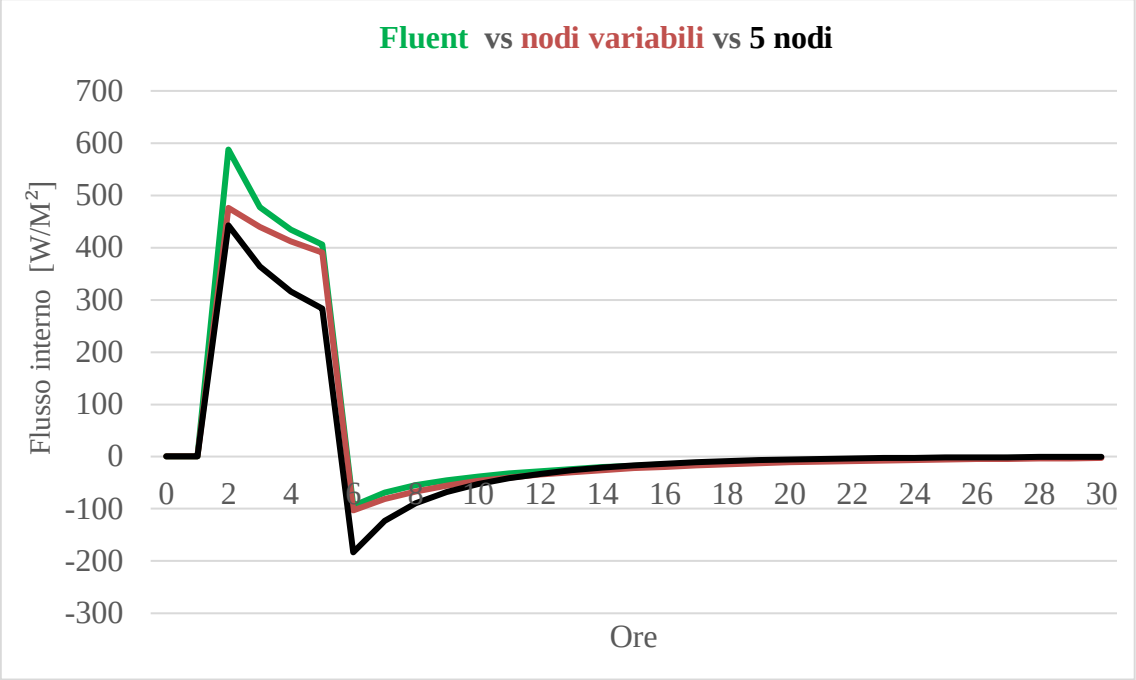

Figure 55: Andamento del flusso interno al variare del metodo per la parete D

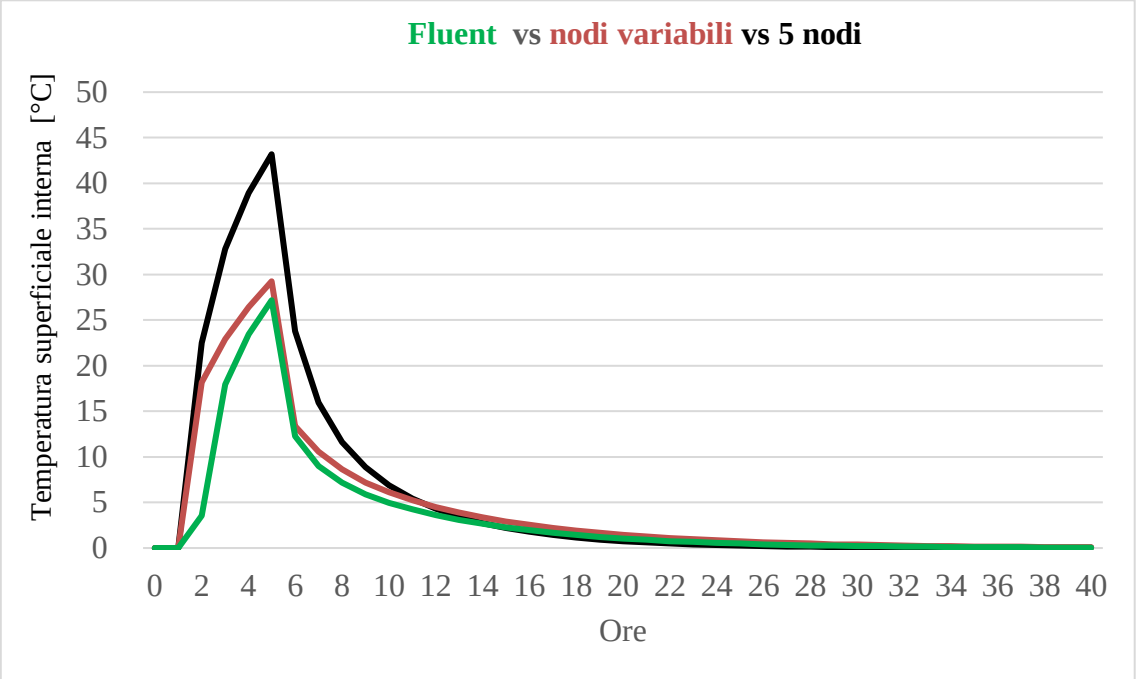

Figura 56: Andamento della temperatura superficiale interna al variare del metodo per la parete D

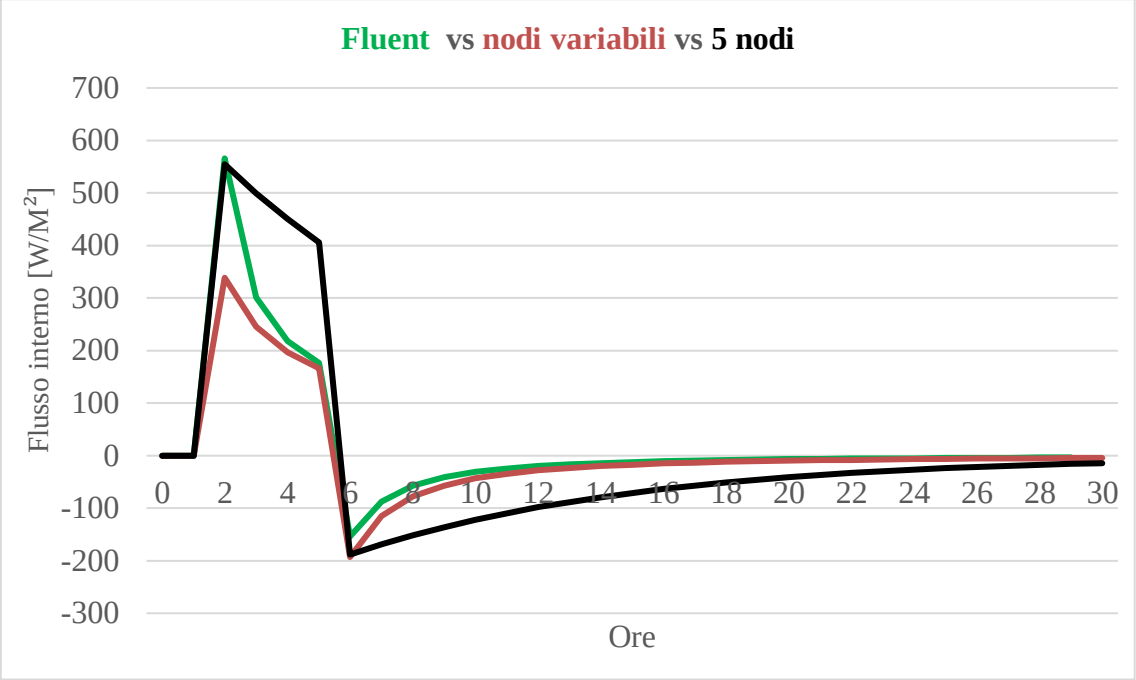

Figura 57: Andamento del flusso interno al variare del metodo per la parete I

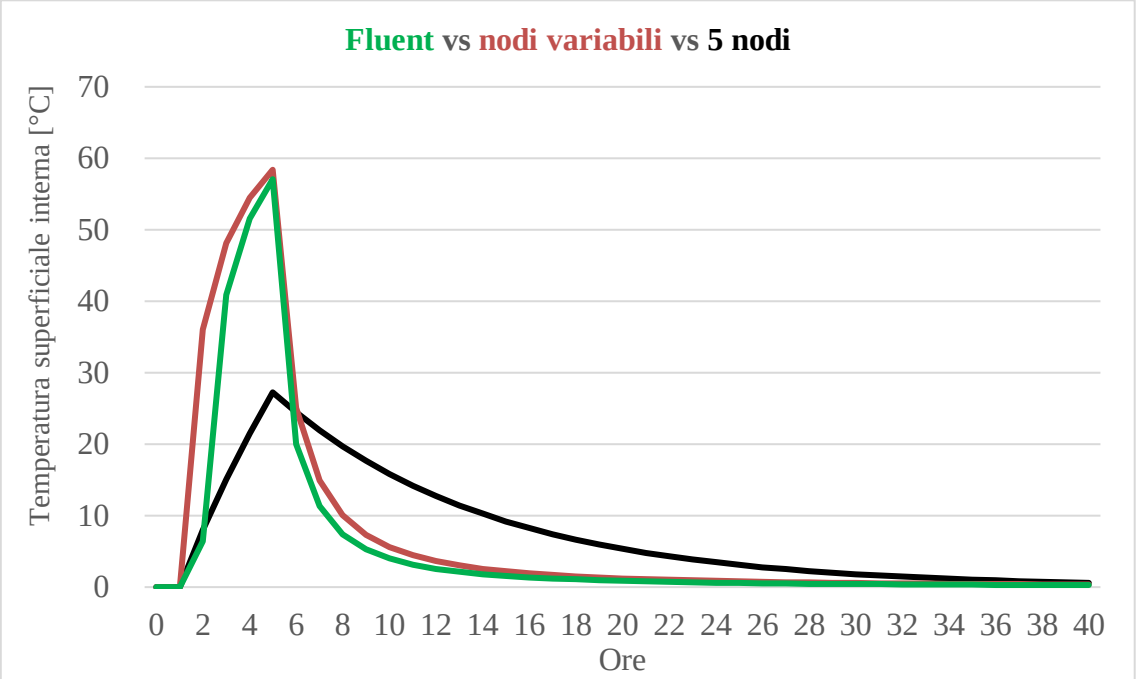

Figura 58: Andamento della temperatura superficiale interna al variare del metodo per la parete I

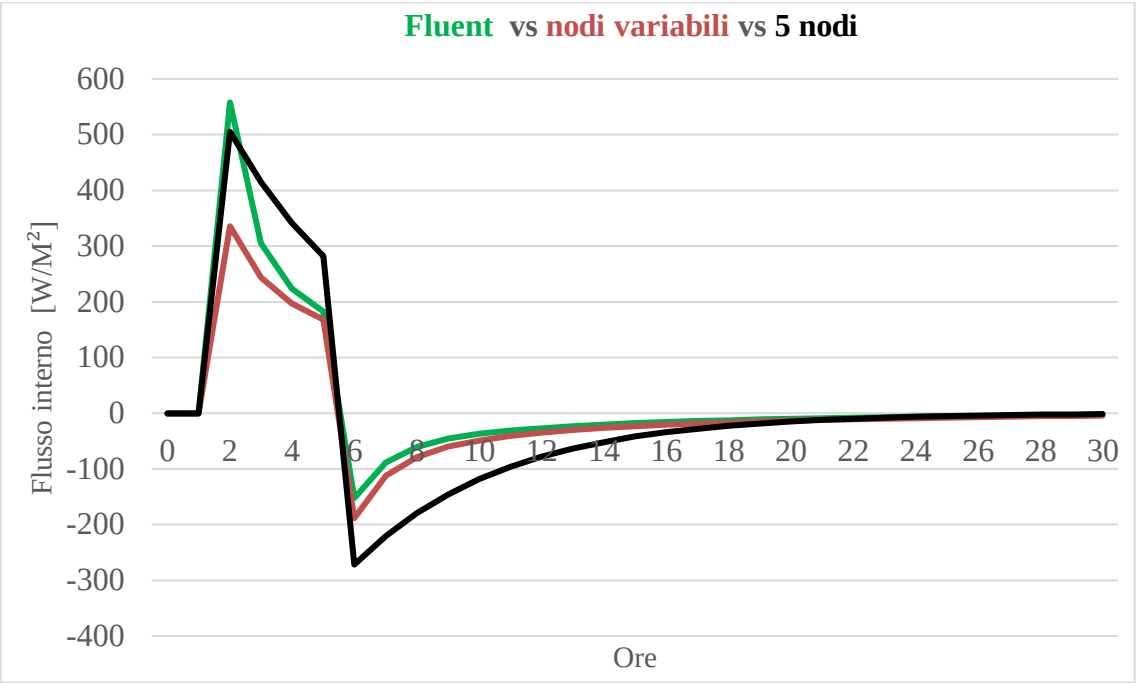

Figura 59: Andamento del flusso interno al variare del metodo per la parete EI

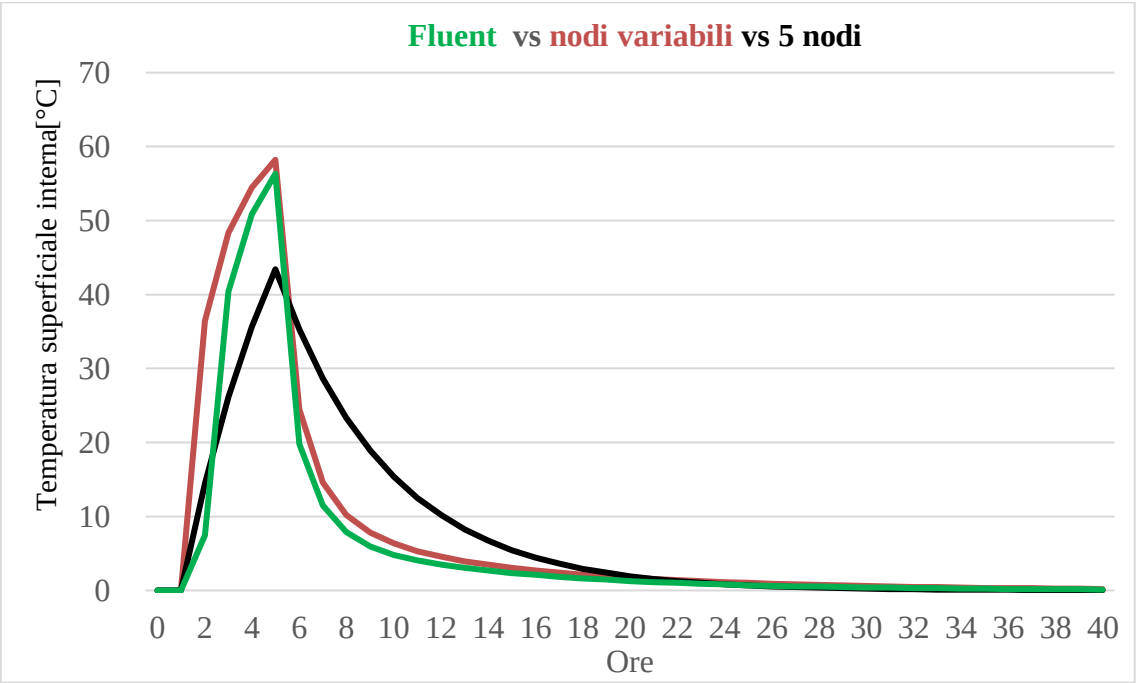

Figura 60: Andamento della temperatura superficiale interna al variare del metodo per la parete EI

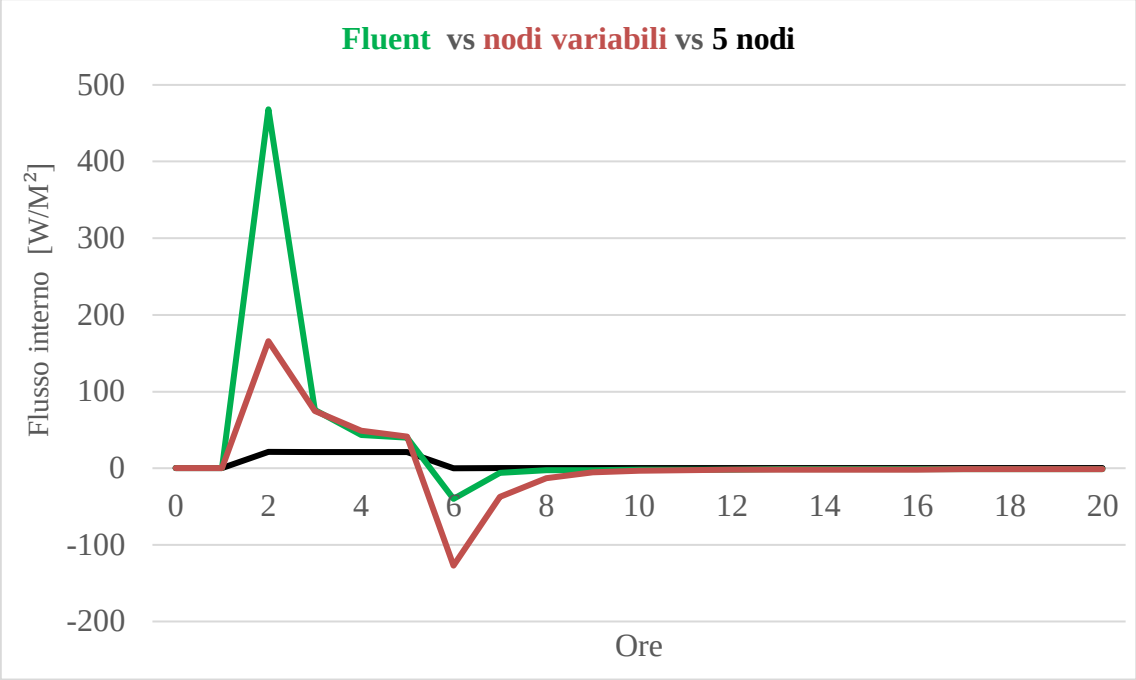

Figure 61: Andamento del flusso interno al variare del metodo per la parete E

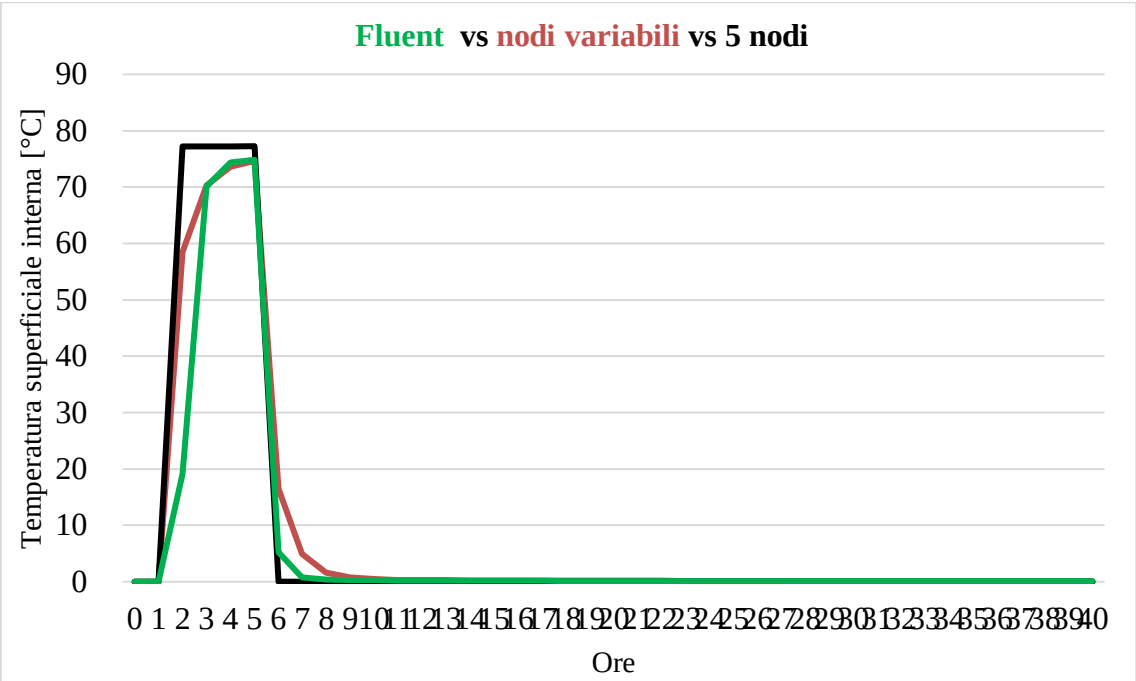

Figura 62: Andamento della temperatura superficiale interna al variare del metodo per la parete E

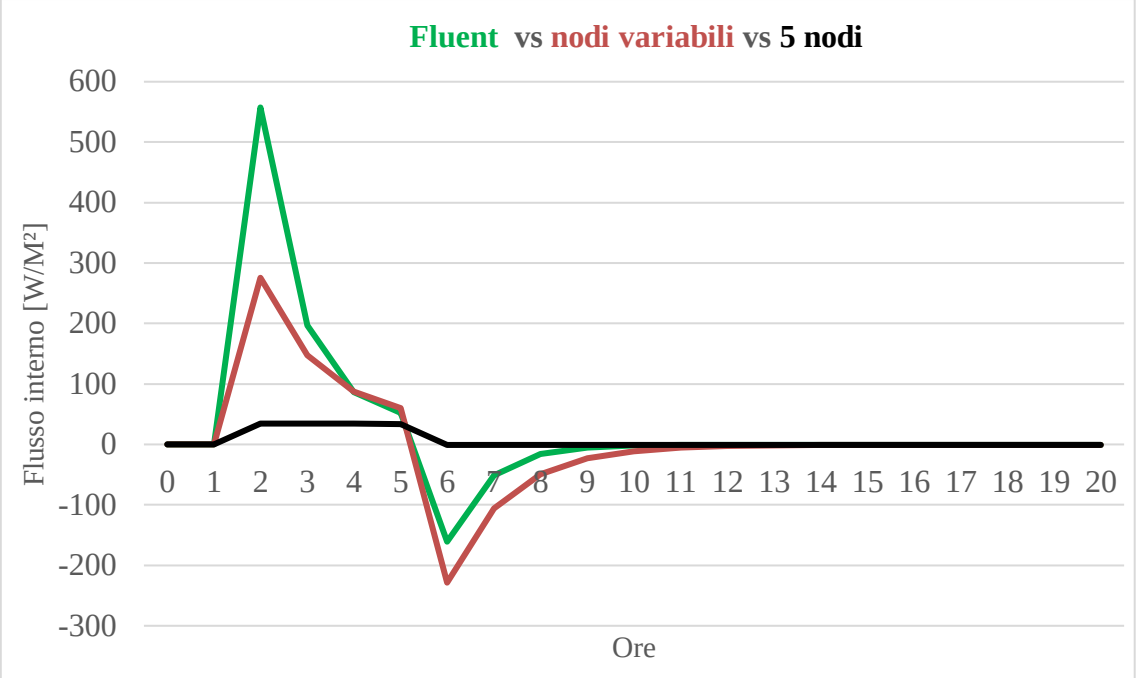

Figura 63: Andamento del flusso interno al variare del metodo per la parete M

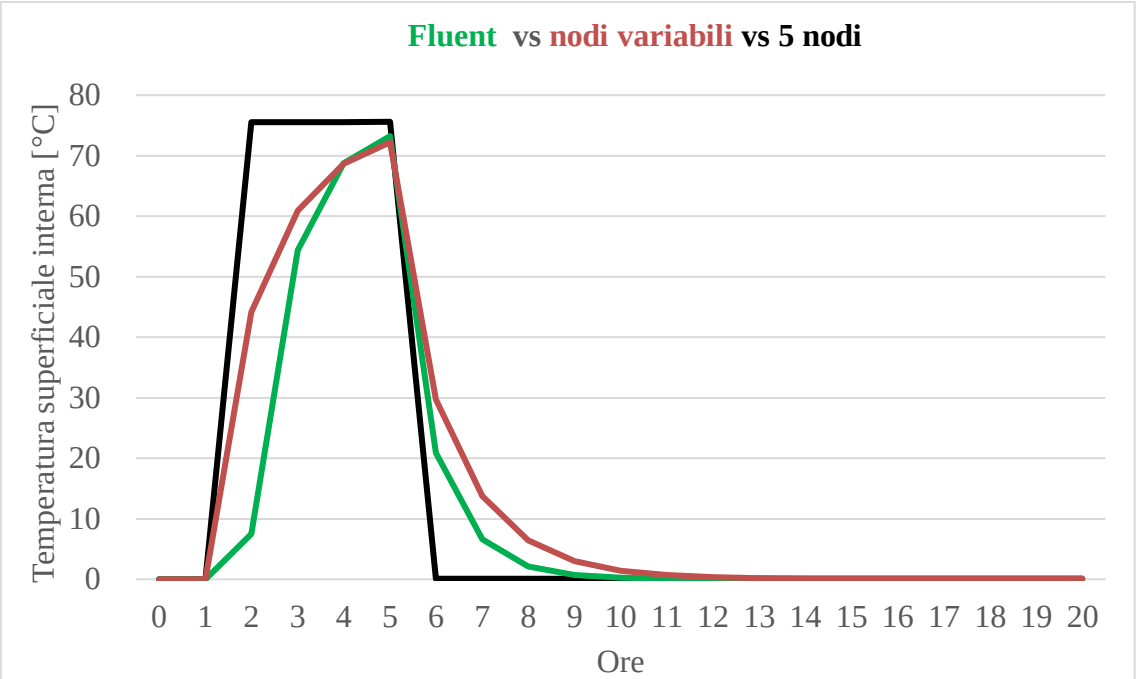

Figura 64: Andamento della temperatura superficiale interna al variare del metodo per la parete M

7. Conclusioni

Il presente studio ha fornito maggiori informazioni circa la valutazione del fenomeno della trasmissione di calore in una dimensione in regime dinamico attraverso un elemento opaco.

Sono state prese in esame 5 pareti opache,comuni nell'edilizia odierna,caratterizzate da stratigrafie e caratteristiche termofisiche differenti,in particolare con diversa posizione dell'isolante e quindi diversa distribuzione delle masse.

L'accuratezza delle soluzioni fornite dalle UNI EN ISO 52016(metodo a nodi fissi e variabili) ,in termini di ampiezza dei flussi termici e temperature superficiali,è stata valutata confrontando le soluzioni con quelle fornite dal metodo analitico definito nella norma UNI EN ISO 13786,applicabile solamente in caso di forzante esterna di tipo armonico.

Nel secondo caso,quello della forzante a carattere impulsivo,non è stato quindi possibile far riferimento alla soluzione analitica:si è quindi ricorsi al confronto con le soluzioni fornite dal software Ansys Fluent,programma di fluidodinamica computazionale di consolidata e comprovata affidabilità.

Sia nel caso della forzante armonica che di quella a carattere impulsivo,i risultati ottenuti col metodo riportato nella norma UN EN ISO 52016-1,Allegato A,sono risultati abbastanza attendibili.I scostamenti minori si sono registrati nel caso della forzante armonica,con errori massimi quasi sempre al di sotto del 20%,e comunque mai superiori al 30%.

E' da segnalare invece una minore accuratezza dei risultati nel caso della forzante a carattere impulsivo,con errori di entità maggiore,come nel caso della parete E(64 %).

Il metodo riportato nella norma UNI EN ISO 52016-1,Allegato B conduce,invece ad errori di gran lunga maggiori,talvolta anche dell'ordine di centinaia di punti percentuali,dimostrando quindi tutti i suoi limiti nel caso di una sua applicazione con le condizioni al contorno considerate nel presente studio.

Le pareti che più di tutti hanno messo in evidenza i limiti del metodo a nodi fissi sono la I(cappotto esterno) e la E(cappotto interno),ossia pareti in cui la massa è concentrata rispettivamente all'interno e all'esterno dello spessore.

Si può quindi concludere che ,la valutazione del comportamento termico dinamico di un elemento opaco ,basata esclusivamente sugli esiti del metodo di discretizzazione a nodi variabili può essere ampliamente accettata ,escludendo i risultati della metodologia a nodi fissi;portando dunque vantaggi nella progettazione in termini computazionali.

Bibliografia e sitografia

[1] Glen E. Myers,Analytical Methods in Conduction Heat Transfer

[2] Prof. Ing. Marco Dell'Isola,Corso di Energetica degli Edifici

[3] Protocollo Itaca,UNI/PdR 13:2015

[4] UNI 13786, Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo.

[5] UNI EN ISO 52016-1:2018,Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti

[6] Ursini-Casalena,Foglio di calcolo excel per il calcolo delle proprietà termiche dinamiche di un componente edilizio.

[7] http://www.afs.enea.it, Ansys Fluent 12 User's guide