

# ANALISI DEL CALORE DI IDRATAZIONE DELLA PLATEA FONDAZIONALE MASSIVA DEL'EDIFICIO PARK TOWER A MILANO CITY LIFE

**Prof. Ing. Antonio Migliacci<sup>1</sup>, Ing. Sergio Levati<sup>2</sup>, Ing. Alessandro Aronica<sup>3</sup>**

1 Politecnico di Milano, MSC Associati S.r.l. Milano.

2 MSC Associati S.r.l. Milano.

3 MSC Associati S.r.l. Milano.

## SOMMARIO

La presente memoria espone l'esperienza intrapresa nel corso della progettazione strutturale della Torre Park Tower di prossima realizzazione a Milano. In particolare, oltre agli studi canonici eseguiti per un edificio alto, per questa struttura è stato svolto un particolare studio finalizzato a valutare un aspetto progettuale importante quale quello del calore di idratazione della platea fondazionale. In seguito verranno esposti i criteri utilizzati per definire il problema termo meccanico, i risultati ottenuti dall'analisi e la validazione della metodologia di calcolo adottata per supportare le calcolazioni svolte.

## Studies of thermal hydration's problem for the mat foundation of Park Tower in Milan.

## SUMMARY

The present paper explains the experience undertaken during the structural design of the Park Tower to be built in Milan. In particular, in addition to the standard studies performed for a tall building, for this structure, a dedicated study was carried out aimed at estimating a particular aspect of the design as important as that of the heat of hydration for the mat foundation of the building. In detail, in this report, the following are summarized: the criteria assumption to define the thermo-mechanical problem, the results obtained from the analysis and the criteria adopted to assess the numerical models.

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1 Prefazione

In questi ultimi anni, anche in Italia, si sta intensificando la realizzazione di edifici alti che sempre più modificano lo skyline delle nostre città. La realizzazione di questa tipologia di costruzioni porta con sé la necessità di risolvere problemi progettuali e cantieristici complessi legati alle dimensioni delle nuove realizzazioni che usualmente, per edifici ordinari, non vengono contemplati. Tra questi, uno dei più rilevanti, è la pianificazione dei getti massivi di grandi dimensioni che costituiscono le platee fondazionali delle future costruzioni. In generale, infatti, gli edifici alti sono caratterizzati da fondazioni massive che si distinguono per il notevole calore di idratazione che si sviluppa subito dopo il getto della fondazione stessa. L'analisi dei gradienti termici, che nascono nello spessore della platea nelle prime ore successive alle operazioni di getto, risulta fondamentale per poter escludere la formazione di fessurazioni corticali legate al problema di congruenza elasto termica della massa di calcestruzzo.

Nelle seguenti memorie si presentano dunque gli studi condotti per l'argomento in oggetto.

### 1.2 Generalità

L'edificio per il quale è stato eseguito il presente studio è la Park Tower di futura realizzazione nell'ex quartiere storico della fiera di Milano oggi denominato City Life.

Il progetto architettonico della torre è stato redatto dallo Studio Daniel Libeskind LCC di New York mentre quello strutturale, definitivo ed esecutivo, dalla MSC Associati S.r.l di Milano. In particolare, il progetto dei cementi armati è a firma dell'Ing. Sergio Levati con il coordinamento tecnico dell'Ing. Andrea Sangalli e la supervisione del Prof. Antonio Migliacci del Politecnico di Milano, tutti e tre soci della MSC Associati S.r.l.

La committenza è invece rappresentata da City Life S.r.l. la quale ha incaricato come General Contractor il gruppo City Contractor S.c.a.r.l.

Il suddetto intervento edilizio consta nella realizzazione di una superficie di oltre 26000 m<sup>2</sup> prevedendo 3 piani interrati e 25 fuori terra destinati principalmente ad uso residenziale.

L'altezza del futuro edificio sarà di oltre 120 metri di cui 105 fuori terra così come rappresentato nella seguente immagine:



Figura 1 – Rendering della Park Tower da piazzale Arduino

## 2. I DATI DI PROGETTO

### 2.1 La platea oggetto di studio

L'analisi del calore di idratazione è stata condotta per la platea fondazionale della torre che, all'interno della più estesa superficie della fondiaria, ha circa le dimensioni dell'edificio fuori terra così come rappresentato nella seguente immagine:



Figura 2 – Platea di fondazione della Torre Park Tower

La superficie in pianta della platea fondazionale è di circa 2600 m<sup>2</sup>; l'altezza di questo elemento strutturale è di 3 metri

nella parte centrale, dove sono presenti i due cores di controvento in calcestruzzo, e di 2 metri nella parte perimetrale dove invece insistono le colonne in cemento armato. Il volume totale del getto è di circa 4600 m<sup>3</sup> realizzati con calcestruzzo di classe C28/35 LH in classe di esposizione XC2, caratterizzato da una resistenza cubica a schiacciamento pari a 35 MPa e una miscela a basso calore di idratazione (Lower Hydration). La classe di consistenza assunta è di tipo autolivellante SCC (Self Compacting Concrete) ciò per migliorare la costipazione del getto nelle fitte armature presenti di tipo B450C, pari a 2 strati  $\Phi$  30 (30x30) per il getto H=2,00 m e 3 strati  $\Phi$  30 (30x30) per il getto H=3,00 più tutti gli infittimenti necessari per l'equilibrio delle sollecitazioni flessionali agenti.

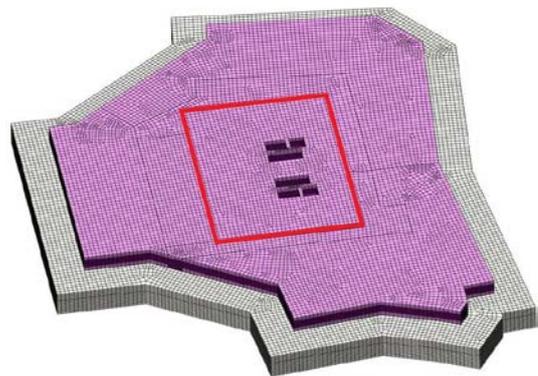


Figura 3 – Vista 3d del getto fondazionale con evidenziata nella parte centrale quella con altezza 3 metri

La soluzione numerica di un problema termo fisico complesso, come quello dello studio del calore di idratazione di un getto massivo, è fortemente condizionata dalla determinazione dei valori di input da assumere preliminarmente all'analisi. Per tale ragione, al fine di definire correttamente i parametri relativi al calcestruzzo senza dover valutare empiricamente quelli presenti in letteratura, con la committenza, già nello sviluppo del progetto esecutivo, si è condiviso di coinvolgere il futuro fornitore delle miscele cementizie. Tale possibilità ha avuto un grosso vantaggio progettuale perché si è riusciti ad individuare e risolvere tutti quei problemi tecnologici ed ergonomici legati alla realizzazione di una lavorazione "fuori scala" come quella di realizzare in un'unica soluzione temporale un getto di calcestruzzo di volume superiore ai 4600 m<sup>3</sup>.

Per quanto riguarda la progettazione della Torre, è stata utilizzata la norma NTC2008 e relativa circolare applicativa più gli Eurocodici 2 e 8 applicati utilizzando i relativi NAD italiani.

## 2.2 I calcestruzzi previsti in progetto

Nel dettaglio, oltre la direzione lavori ed il collaudatore statico in corso d'opera, è stata coinvolta la Società Unical del gruppo Buzzi – Unicem la quale, per le proprie miscele, ha fornito i seguenti parametri che hanno permesso di qualificare le caratteristiche fisiche dei calcestruzzi in progetto.

classe di resistenza	C28/35 a 60 giorni	UNI EN 206-1, UNI 11104
classe di consistenza	SCC	UNI EN 206-1, UNI 11104
diametro massimo aggregato	20 mm	UNI EN 206-1, UNI EN 12620
$\Delta$ termico massimo	$\leq 35^\circ\text{C}$ in condizioni adiabatiche	
ritardo dei tempi di indurimento	modulati da +16 a +0 ore in base all'avanzamento del getto	
mantenimento classe SCC	> 60 minuti dopo l'arrivo in cantiere dell'autobetoniera	
garanzia di filling / passing	target spandimento > 700 mm	
garanzia di coesione impasto	target V-funnell >> 4" + no bleeding	
spandimento a tempi vari	~ 710 mm (5') ~ 720 mm (30') ~ 720 mm (60') ~ 700 mm (90')	
tempo di efflusso V-funnell	12 secondi	
$\Delta$ SF con anello a J (J-ring)	PJ $\leq 10$ mm	
essudazione d'acqua	nulla	
scorrimento confinato L-box	PL $\geq 0,95$	

Tabella 1 – Caratteristiche dei calcestruzzi in progetto

### COMPONENTI BASE

Cemento pozzolanico a basso calore di idratazione <i>conforme UNI EN 197-1</i>	CEM 32,5 N IVA-P formulato ad hoc per il SCC LH Unical dallo stabilimento Buzzi Unicem di Tirino (VC)
Aggiunta di tipo I <i>conforme UNI EN 12620 e UNI 8520</i>	Filler micronizzato calcareo a PSD predefinita e garantita dello stabilimento Nicem di Bergamo
Additivo superfluidificante speciale <i>conforme UNI EN 934-2</i>	additivo superfluidificante a base carbossilica a lungo mantenimento formulato ad hoc per il SCC LH Unical dallo stabilimento Addiment di Medolago
Additivo ritardante <i>conforme UNI EN 934-2</i>	additivo ritardante dei processi di idratazione dello stabilimento Addiment di Medolago

### DATI SPERIMENTALI ALLO STATO FRESCO

questi i parametri misurati sul calcestruzzo fresco durante le sperimentazioni di qualifica

Massa volumica	2365 kg/m <sup>3</sup>
Spandimento a 30'	725 mm
Tempo di efflusso	12 secondi (anche dopo 5')
$\Delta$ SF con anello a J (J-ring)	PJ = 5 mm
Essudazione d'acqua	nulla
Scorrimento confinato L-box	PL $\geq 0,95$
Contenuto d'aria	1,8 %

Tabella 2 – Caratteristiche dei calcestruzzi in progetto

Per quanto concerne lo sviluppo di calore del calcestruzzo nel tempo, i tecnologi della Unical hanno fornito la curva adiabatica della miscela prevista in progetto. Tale curva, la quale riporta lo sviluppo nel tempo della temperatura successivamente il getto iniziale, è stata determinata mediante una campagna di prove sperimentali eseguite ad hoc nei propri laboratori. La curva è stata definita attraverso test eseguiti su campioni prova isolati termicamente, quindi in condizioni adiabatiche, rispetto all'ambiente esterno. La temperatura iniziale del getto è stata stimata in 20°C assumendo quindi

che, dalla miscelazione iniziale nell'impianto di betonaggio, nel corso del trasporto in cantiere, la miscela inizia a riscaldarsi in relazione alla reazione esotermica legata appunto all'idratazione del cemento.

La curva adiabatica risulta quindi quella rappresentata nella seguente immagine:

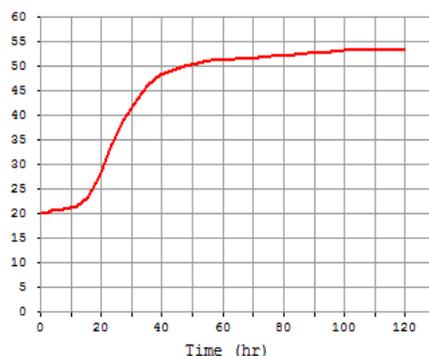


Figura 4 – Curva adiabatica dei calcestruzzi in progetto

Il diagramma, in particolare, evidenzia una temperatura massima della miscela di 53°C a circa 120 ore dal getto iniziale originando quindi un delta termico di 33°C. Infine, per l'impostazione dell'analisi numerica, sono stati condivisi i valori del calore specifico del calcestruzzo, assunto pari a 892.5 J/kg K, e quello della conducibilità termica, assunta pari a 2 W/m K.

## 2.2 Definizione delle fasi di getto della platea

Definite le caratteristiche fisiche del calcestruzzo, per studiare l'evoluzione nel tempo delle temperature all'interno dello spessore della platea, è stato necessario fare un progetto esecutivo delle fasi di getto per la realizzazione della fondazione. Il primo dato che si è condiviso con i tecnologi della Unical è stato quello relativo alla capacità di approvvigionamento che è stata valutata pari a 130 m<sup>3</sup>/ora equivalenti all'arrivo in cantiere di 13 betoniere di 10 m<sup>3</sup> cadauna all'ora.

Tale capacità di approvvigionamento è stata ritenuta possibile grazie a 2 centrali di betonaggio del gruppo, limitrofe all'area di cantiere, dedicate esclusivamente alla fornitura del calcestruzzo della platea fondazionale. Nella valutazione di tale parametro, è stato peraltro individuato un terzo impianto di riserva, necessario nel caso, nel corso delle operazioni di getto, si fossero manifestati problemi ad uno dei primi due impianti.

Il getto della platea è stato programmato attraverso l'utilizzo di due autopompe collocate diametralmente circa opposte rispetto al perimetro del getto stesso, capaci con i loro bracci di coprire l'intera superficie della platea. Anche in questo caso si è programmata la presenza stabile di una terza pompa nel caso, nel corso delle operazioni di getto, si fossero presentati problemi ad una delle prime due. Il posizionamento delle autopompe è stato valutato congruentemente alla logistica di cantiere al fine di permettere l'arrivo, lo stazionamento e la ripartenza delle betoniere evitando intralci alla circolazione con conseguenti problemi di tempistica nella realizzazione del getto stesso.

Adottando un calcestruzzo di tipo SCC, si è valutato che da ogni singolo punto di colata, si potesse coprire una superficie di 7 metri di raggio e ciò ha permesso di definire 12 punti di getto per ogni pompa per coprire l'intera superficie della platea. La velocità di scarico di ogni betoniera, sulla scorta di lavori analoghi, è stata valutata in 8 min a macchina.



Figura 5 – Layout di cantiere per le fasi di getto

In base a queste informazioni, si è allora riusciti a valutare le velocità di getto della platea; in particolare, considerando una velocità di afflusso di 130 m<sup>3</sup>/ora, si è stimata una velocità di getto di 33 cm/ora per il primo metro della parte di platea alta 3 metri e, per la restante superficie, una velocità pari a 6,25 cm/ora. Con tali dati si è ricavato allora che il tempo totale previsto per il getto risulta di circa 35 ore consecutive. La definizione di questi parametri ha definito le ascisse temporali dell'analisi di costruzione per fasi e ciò ha permesso di valutare l'evoluzione delle temperature considerando anche il transitorio termico iniziale.

## 2.2 Analisi delle temperature ambientali

Avendo programmato il getto tra la fine di Maggio e i primi di Giugno, è stata fatta un'attenta valutazione delle temperature esterne dell'aria in questo periodo dell'anno facendo un'esamina delle medie trentennali delle temperature registrate negli aeroporti di Milano Malpensa e Milano Linate. In particolare, analizzando le medie statistiche registrate dalle stazioni meteorologiche aeroportuali, si sono riscontrati i seguenti dati di temperatura:

STAZIONE 066-MILANO MALPENSA medie mensili periodo 61 - 90												
	Tx1d	Tx2d	Tx3d	Tx-m	Tn1d	Tn2d	Tn3d	Tn-m	Tx>S	Td<I	OT>S	OT<I
gennaio	5.4	5.7	6.9	6.1	-5.2	-4.1	-3.9	-4.4	0.0	25.8	0.0	9.4
febbraio	7.9	8.4	9.5	8.6	-3.0	-2.4	-2.2	-2.5	0.0	21.1	0.0	5.9
marzo	11.3	12.9	15.0	13.1	-1.4	0.4	2.0	0.4	0.0	14.4	0.0	2.1
aprile	15.1	17.4	19.1	17.2	0.7	1.7	3.1	1.8	0.0	7.4	0.0	0.0
<b>maggio</b>	<b>20.9</b>	<b>21.9</b>	<b>22.5</b>	<b>21.3</b>	<b>7.2</b>	<b>9.5</b>	<b>10.1</b>	<b>9.0</b>	<b>5.3</b>	<b>0.5</b>	<b>0.4</b>	<b>0.0</b>
<b>giugno</b>	<b>23.9</b>	<b>25.3</b>	<b>27.1</b>	<b>25.3</b>	<b>11.3</b>	<b>12.4</b>	<b>14.2</b>	<b>12.6</b>	<b>10.3</b>	<b>0.0</b>	<b>2.9</b>	<b>0.0</b>
luglio	29.2	29.7	29.0	29.6	14.7	15.6	15.8	15.3	27.5	0.0	6.8	0.0
agosto	28.8	29.2	28.0	27.6	15.7	15.3	13.8	14.8	25.0	0.0	5.4	0.0
settembre	25.4	24.1	22.7	24.0	12.8	11.8	10.8	11.5	13.5	0.0	1.6	0.0
ottobre	20.5	18.1	16.2	18.2	8.9	6.5	4.0	6.4	1.0	2.8	0.0	0.1
novembre	13.0	11.4	9.3	11.2	2.9	0.8	-1.8	0.7	0.0	14.5	0.0	2.6
dicembre	9.1	7.0	5.9	6.9	-3.1	-3.0	-3.8	-3.6	0.0	24.9	0.0	8.5

STAZIONE 066-MILANO MALPENSA medie mensili periodo 61 - 90												
	Tx1d	Tx2d	Tx3d	Tx-m	Tn1d	Tn2d	Tn3d	Tn-m	Tx>S	Td<I	OT>S	OT<I
gennaio	5.4	5.7	6.9	6.1	-5.2	-4.1	-3.9	-4.4	0.0	25.8	0.0	9.4
febbraio	7.9	8.4	9.5	8.6	-3.0	-2.4	-2.2	-2.5	0.0	21.1	0.0	5.9
marzo	11.3	12.9	15.0	13.1	-1.4	0.4	2.0	0.4	0.0	14.4	0.0	2.1
aprile	15.1	17.4	19.1	17.2	0.7	1.7	3.1	1.8	0.0	7.4	0.0	0.0
<b>maggio</b>	<b>20.9</b>	<b>21.9</b>	<b>22.5</b>	<b>21.3</b>	<b>7.2</b>	<b>9.5</b>	<b>10.1</b>	<b>9.0</b>	<b>5.3</b>	<b>0.5</b>	<b>0.4</b>	<b>0.0</b>
<b>giugno</b>	<b>23.9</b>	<b>25.3</b>	<b>27.1</b>	<b>25.3</b>	<b>11.3</b>	<b>12.4</b>	<b>14.2</b>	<b>12.6</b>	<b>10.3</b>	<b>0.0</b>	<b>2.9</b>	<b>0.0</b>
luglio	29.2	29.7	29.0	29.6	14.7	15.6	15.8	15.3	27.5	0.0	6.8	0.0
agosto	28.8	29.2	28.0	27.6	15.7	15.3	13.8	14.8	25.0	0.0	5.4	0.0
settembre	25.4	24.1	22.7	24.0	12.8	11.8	10.8	11.5	13.5	0.0	1.6	0.0
ottobre	20.5	18.1	16.2	18.2	8.9	6.5	4.0	6.4	1.0	2.8	0.0	0.1
novembre	13.0	11.4	9.3	11.2	2.9	0.8	-1.8	0.7	0.0	14.5	0.0	2.6
dicembre	9.1	7.0	5.9	6.9	-3.1	-3.0	-3.8	-3.6	0.0	24.9	0.0	8.5

Tx1d, Tx2d, Tx3d = media della temperatura massima della prima, seconda e terza decade del mese [°C]  
 Tx-m = media della temperatura massima dell'intero mese [°C]  
 Tn1d, Tn2d, Tn3d = media della temperatura minima della prima, seconda e terza decade del mese [°C]  
 Tn-m = media della temperatura minima dell'intero mese [°C]  
 Tx>S = numero medio di giorni al mese con temperatura massima superiore a S = 25°C  
 Td<I = numero medio di giorni al mese con temperatura minima inferiore a I = 0°C  
 OT>S = numero medio di ore al giorno con temperatura superiore o uguale a S = 25 °C  
 OT<I = numero medio di ore al giorno con temperatura inferiore o uguale a I = 0 °C

Tabella 3 – Temperature statistiche nelle stazioni meteorologiche di Milano Linate e Milano Malpensa

Dalle statistiche trentennali analizzate, per il periodo considerato per il quale è stato programmato il getto fondazionale, si è calcolata una temperatura media T<sub>0</sub>=17,38°C con oscillazione ΔT di ± 7,38°C tra il giorno e la notte. La temperatura dell'aria esterna è stata allora ritenuta variabile nel tempo assumendo la seguente espressione sinusoidale:

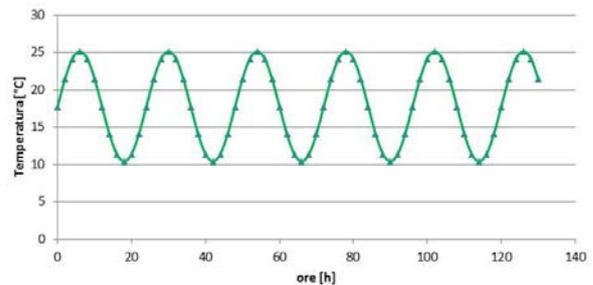


Figura 6 – Temperatura esterna dell'aria assunta in progetto

Per quanto concerne la temperatura del terreno a contatto con l'intradosso della platea, si è assunta quella definita dalla norma UNI EN 15450:2008 che, per la quota - 15,00 m pari a quella di imposta della fondazione, definisce un valore di 10°C.

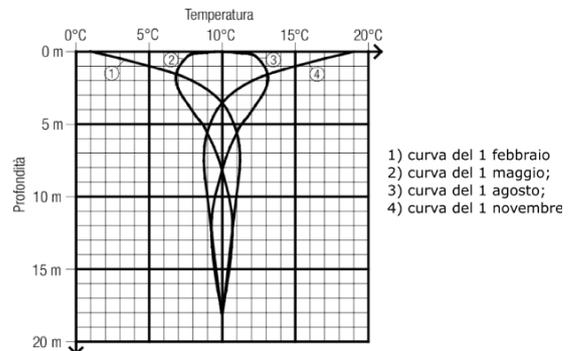


Figura 7 – Temperatura del terreno secondo UNI EN 15450

L'oscillazione di temperatura giornaliera del terreno è stata considerata con una variazione di  $\pm 2,00^{\circ}\text{C}$  tra il giorno e la notte. Per il terreno si è assunto un valore del calore specifico pari a  $837.2 \text{ J/kg K}$  mentre per la conducibilità termica un valore pari a  $1.97 \text{ W/m K}$ .

Il coefficiente di scambio termico per convezione naturale del flusso di calore sulla superficie corticale del getto è stato assunto pari a  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$  in quanto, la particolare posizione di getto, ha suggerito una velocità media del vento inferiore a  $4 \text{ m/s}$ .

### 3. ANALISI NUMERICA

#### 3.1 Obiettivo dell'analisi

Lo scopo di svolgere un'analisi del calore di idratazione è stata mirata a determinare, nello spazio e nel tempo, il campo delle temperature che si sviluppa all'interno del getto conseguente al calore rilasciato dalla reazione esotermica di idratazione dei cementi costituenti l'impasto. Tale analisi è stata impostata per poter quantificare le differenze di temperature tra le parti centrali del getto (più calde) e quelle estradosali (più fredde). Infatti, in fase di raffreddamento della massa di calcestruzzo, tali differenze inducono degli stati di trazione superficiali che, se troppo elevati, possono generare delle fessurazioni sull'estradosso del getto compromettendo la durabilità delle armature e quindi la funzionalità statica dell'elemento fondazionale.

L'analisi svolta attraverso la simulazione numerica, ha permesso quindi di risolvere tale problema termofisico che, considerando il comportamento termico del calcestruzzo, lo sviluppo del calore di idratazione, le condizioni di temperatura e di convezione al contorno, hanno permesso di risolvere, nel dominio del tempo e dello spazio, l'evoluzione delle temperature e i relativi gradienti termici.

Tale problema è stato quindi risolto numericamente attraverso l'equazione di Fourier in seguito esplicitata.

Forma generale nelle tre dimensioni spaziali:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

oppure, espressa sinteticamente tramite l'operatore laplaciano:

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad \text{con} \quad \alpha = \frac{k}{\rho c}$$

dove:

$\alpha$  = diffusività termica

$k$  = conducibilità termica  $[\text{W/mK}]$

$\rho$  = densità volumica  $[\text{kg/m}^3]$

$c$  = calore specifico  $[\text{J/kgK}]$

$\dot{q}_g$  = energia generata per unità di tempo e di volume  $[\text{W/m}^3]$

Figura 8 – Equazione di Fourier

#### 3.2 Il modello ad elementi finiti

L'analisi numerica è stata svolta realizzando un modello ad elementi finiti generato con il software Midas Fea ® di Midas Information Technology Co LTD. In particolare è stato realizzato un modello con elementi finiti solidi di tipo brick ad 8 nodi i quali hanno discretizzato un volume di dimensioni in

pianta pari a  $1400 \times 1700 \text{ cm}$  ed altezza pari a  $200$  e  $300 \text{ cm}$  rappresentativo della platea oggetto di studio.

Il modello, composto di  $46508$  elementi finiti, è stato vincolato attraverso opportuni vincoli cinematici piuttosto che termo meccanici come quelli adiabatici imposti sulle superfici perimetrali.

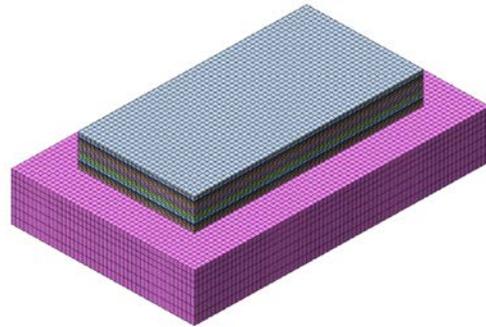


Figura 9 – Vista del modello ad elementi finiti

La discretizzazione del volume solido è stata eseguita per strati di idonea altezza che, attraverso un'analisi di costruzione per fasi, hanno simulato l'aumento dell'altezza del getto nel tempo con velocità definite in 2.2.

In particolare, gli steps temporali con cui è stata eseguita l'analisi, sono quelli rappresentati nella seguente tabella :

STEP	Layer [cm]	Durata step [h]	N° divisioni
1	33	1	1
2	33	1	1
3	34	1	1
4	12,5	2	1
5	12,5	2	1
6	12,5	2	1
7	12,5	2	1
8	12,5	2	1
9	12,5	2	1
10	12,5	2	1
11	12,5	2	1
12	12,5	2	1
13	12,5	2	1
14	12,5	2	1
15	12,5	2	1
16	12,5	2	1
17	12,5	2	1
18	12,5	2	1
19	12,5	26	13
		61	10
Totale ore		120	

Tabella 4 – Steps temporali della costruzione per fasi

I risultati dell'evoluzione delle temperature nello spazio e nel tempo sono stati diagrammati per due particolari verticali di indagine così come rappresentato nella seguente sezione:

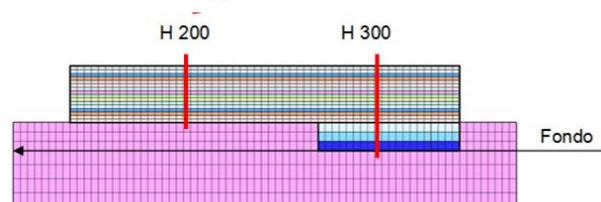


Figura 10- Verticali di indagine analizzate

### 3.3 Risultati dell'analisi numerica

I risultati ottenuti dall'analisi ad elementi finiti sono stati allora rappresentati con grafici bidimensionali dove in ascissa è stato definito il tempo mentre in ordinata le temperature. Ogni singola curva riporta quindi l'evoluzione della temperatura per un nodo ad una determinata altezza rispetto il fondo cassero. Nei seguenti grafici si riportano, per vari punti, le temperature ottenute nell'analisi nelle verticali della platea rispettivamente di altezza 2 e 3 metri:

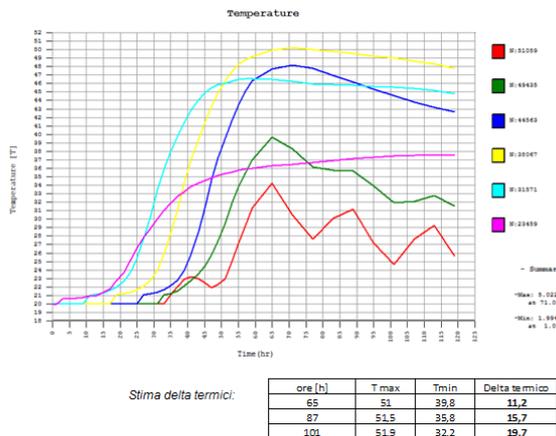


Figura 11 – Andamento delle temperature nel getto H=2 m

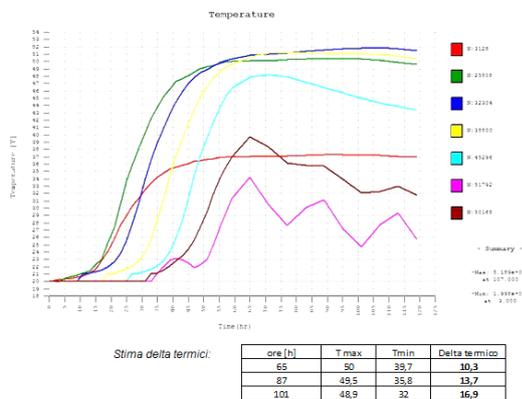


Figura 12 – Andamento delle temperature nel getto H=3 m

In particolare, i precedenti grafici evidenziano curve crescenti in termini di temperature più si aumenta la distanza dei punti di controllo rispetto all'estradosso del getto. Le curve più basse, prossime all'estradosso della platea, tendono alla variazione sinusoidale della temperatura esterna imposta al contorno. Quelle più alte, caratteristiche dei punti centrali, tendono invece alla curva adiabatica. I gradienti termici massimi rilevati, tra la mezzeria dell'altezza del getto e la superficie estradosso, risultano essere pari a 19,7 °C per la sezione di altezza h=2,00 m mentre 16,9°C per quello di altezza h=3,00 m.

Per quanto riguarda l'andamento degli sforzi principali, nelle seguenti immagini, sono stati diagrammati quelli di massima trazione nelle prime 2 direzioni principali:

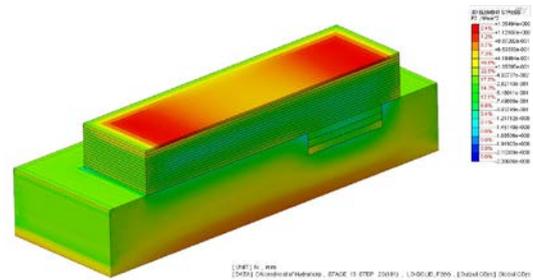


Figura 13 – Sforzi principali in direzione 1

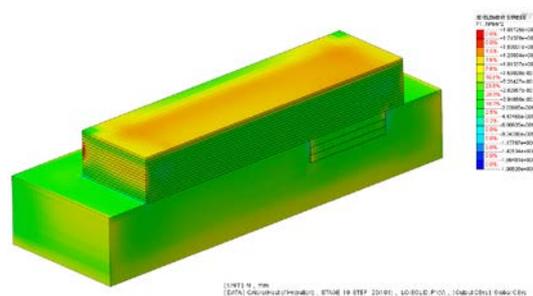


Figura 14 – Sforzi principali in direzione 2

### 3.4 Analisi dei risultati

I dati ottenuti dall'elaborazione numerica sono risultati significativi per poter escludere possibili fessurazioni corticali in relazione alle deformazioni termiche differenziali nel getto dovute al calore di idratazione. In primis, l'entità del massimo gradiente termico registrato tra la mezzeria dell'altezza del getto (più calca) e la parte estradosso (più fredda), è risultata inferiore a 20°C. Tale valore è oggettivamente riconosciuto in letteratura come massimo accettabile per escludere l'insorgenza di tali problematiche.

In secondo luogo, si sono confrontate le tensioni massime di trazione nel calcestruzzo, ottenute nella modellazione numerica, con le resistenze a trazione sperimentali ottenuta da prove in laboratorio per le miscele in progetto per un tempo pari a quello del massimo gradiente termico (66 ore). In particolare è risultato :

Sforzo massimo principale di trazione sullo strato corticale:  
 $\sigma_{2,max} = 1.35 \text{ MPa} < f_{ct,66h} \approx 1.68 \text{ MPa}$

Il rispetto di tale disuguaglianza ha permesso ancora di asseverare la possibilità di realizzare il getto in soluzione continua escludendo nuovamente l'insorgere di fessurazioni corticali legate a problemi di temperatura.

### 3.4 Validazione del modello di calcolo

Nell'esecuzione di una modellazione numerica così complessa le NTC 2008 al cap. 10.2 "ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L'AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO" prevedono che: "Qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti, curando nel contempo che la presentazione dei risultati stessi sia tale da garantirne la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità". Tale controllo, peraltro, è stato richiesto esplicitamente dalla committenza per legittimare una calcolazione così complessa e nuovamente escludere possibili problemi successivamente l'esecuzione del getto.

La validazione del modello di calcolo è stata possibile riproducendo un getto massivo realizzato da Unical per un'altra commessa, nel quale è stato eseguito un monitoraggio termico di cui sono stati resi disponibili gli input e gli output registrati.

In particolare, è stato simulato il getto di una platea fondazionale di spessore 4,4 m eseguita in una soluzione continua di getto durata 85 ore. La determinazione delle caratteristiche termo fisiche di contorno al problema è stata eseguita analogamente a quanto precedentemente presentato per lo studio della platea della Park Tower.

Si riporta in seguito un'immagine rappresentativa del secondo modello ad elementi finiti creato ad hoc per questo studio di validazione:

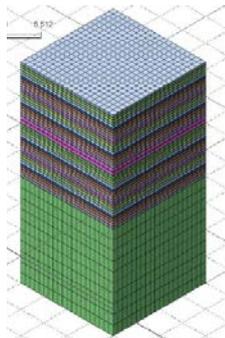


Figura 15 – Vista del secondo modello ad elementi finiti

I risultati ottenuti nella seconda analisi sono rappresentati nel seguente grafico:

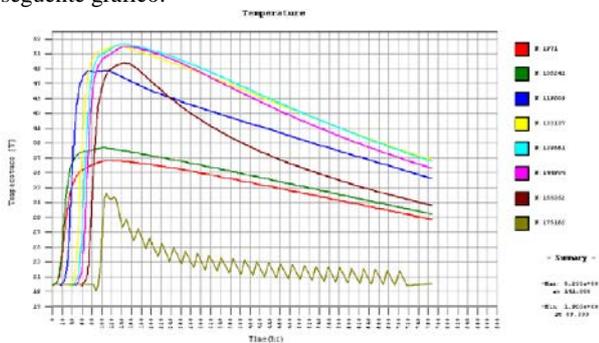


Figura 16 – temperature nel secondo modello

Gli sviluppi temporali delle temperature teoriche sono allora stati confrontati con quelli acquisiti dalle termocoppie nel corso del getto ottenendo le seguenti comparazioni:

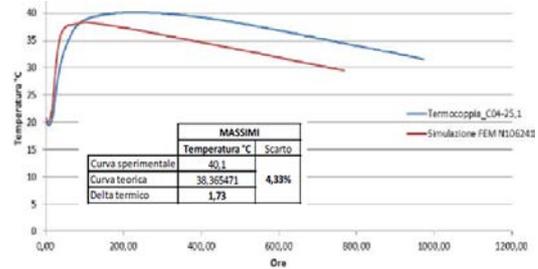


Figura 17-Confronto delle temperature a quota 0,1 m

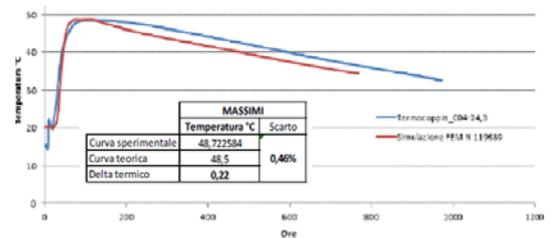


Figura 18-Confronto delle temperature a quota 0,9 m

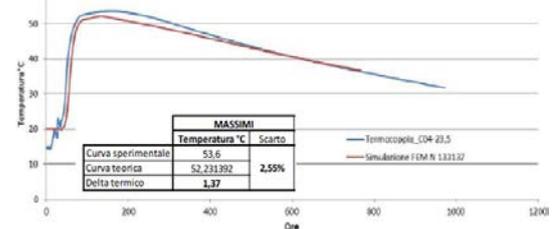


Figura 19-Confronto delle temperature a quota 1,7 m

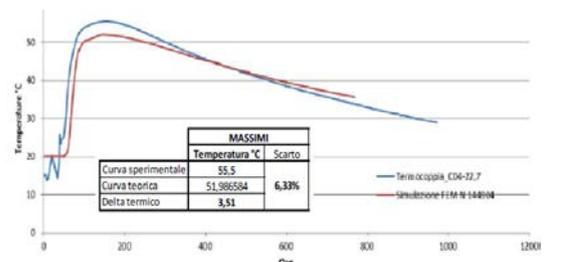


Figura 20-Confronto delle temperature a quota 2,5 m

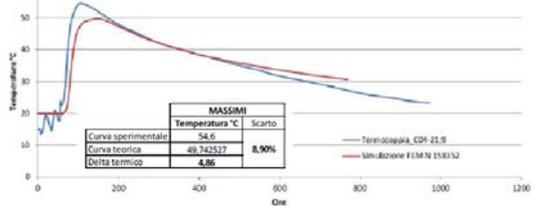


Figura 21-Confronto delle temperature a quota 3,3 m

La comparazione dei risultati teorici con quelli sperimentali, ha evidenziato differenze di temperature molto contenute, mediamente sotto il 6%, e tale risultato ha permesso di validare la metodologia di calcolo assunta per l'analisi delle

temperature che quindi può essere applicata con risultati più che soddisfacenti.

#### **4. CONCLUSIONI**

##### **4.1 Commento sull'attendibilità delle analisi**

Alla luce dei risultati ottenuti delle analisi numeriche svolte, è stato quindi ritenuto accettabile poter realizzare il getto della platea della Park Tower in un'unica soluzione temporale continuativa.

Si ritiene quindi che, la metodologia di analisi presentata, partendo dalla definizione dei dati di input, passando poi per la creazione di appositi modelli numerici ed infine interpretando i dati così come presentato, possa essere adoperata per lo studio di problematiche in cui il calore di idratazione di getti massivi risulta fondamentale per escludere problemi esecutivi di realizzazione di grandi platee fondazionali o grandi elementi in calcestruzzo.

##### **4.2 Ringraziamenti**

Si vuole infine ringraziare l'Ing. Claudia Lualdi della MSC Associati S.r.l. per il contributo fornito nella realizzazione delle modellazioni ad elementi finiti realizzate per gli studi presentati.

