



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Costruzioni e Trasporti

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

CARATTERIZZAZIONE TERMICA E MECCANICA DI UN CALCESTRUZZO JEUNE AGE

Relatore: Ch.^{mo} Prof. Ing. Renato Vitaliani

Laureando: Michela Crespini

Anno Accademico 2010-2011

Sommario

1. Premessa	3
2. Caratterizzazione termica del materiale	5
2.1 Bibliografia.....	6
2.1.1 Il ritiro: struttura del calcestruzzo e meccanismi all'origine del fenomeno	6
2.1.1.1 Introduzione.....	6
2.1.1.2 La reazione di idratazione.....	8
2.1.1.3 Il ritiro endogeno	12
2.1.1.4 Il ritiro termico	19
2.1.2 Coefficiente di dilatazione termica.....	21
2.1.2 .1 Introduzione.....	21
2.1.2 .2 Materiale in letteratura.....	21
2.2 Parte sperimentale.....	30
2.2.1 Strumenti utilizzati	33
2.2.2.1.1 Taratura dei captori di spostamento (LVDT)	42
2.2.2.2 Influenza della temperatura sulle misure effettuate.....	51
2.2.2.2.1 Influenza della temperatura ambiente MC002-MC005.....	51
2.2.2.2.2 Influenza della temperatura dell'acqua MC003	60
2.2.2.3 Inerzia termica del sistema e gradienti di temperatura nel provino.....	66
2.2.2.3.1 Simulazione della risposta termica	66
2.2.2.3.2 Risposta della temperatura dell'acqua a una consegna imposta MC004	70
2.2.2.3.3 Risposta della temperatura del provino in funzione della temperatura dell'acqua MC009	74
2.2.2.4. Analisi sperimentale di risposte termiche sinusoidali MC006-MC007-MC008	76
2.2.2.5 Simulazione termica	92
2.2.2.5.1 Gradiente di temperatura tra bagno termostatico e BTJASPE MC012.....	96
2.2.2.6 Monitoraggio del CDT nel calcestruzzo MC006-MC008-MC010-MC011-MC013	98
3. Caratterizzazione Meccanica del materiale	113
3.1 Bibliografia.....	114
3.1.1 Fluage	114
3.2 Parte sperimentale.....	123
3.2.1 Strumenti utilizzati	124
3.2.2 Prova calorimetrica (QAB) ed Espressione dei risultati in funzione del grado di idratazione	129
3.2.4 Prova di Fluage MC014.....	137

3.2.4.1. Carichi massimi raggiungibili in ciascun ciclo e comparazione con la curva reale delle resistenze a compressione	141
3.2.4.2. Metodo per isolare il Fluage	144
3.2.4.2.1. Studio e modellizzazione del fluage	144
3.2.4.2.1 Modellizzazione basata sul modello di Dirichlet applicato al fluage normalizzato	149
3.2.4.2.3. Utilizzo del modello per la simulazione del comportamento a jeune âge	161
3.2.5 Prova di Rilassamento	162
3.2.5.1 Modellizzazione basata sul concetto di rilassamento normalizzato	167
3.2.6 Monitoraggio del coefficiente di Poisson MC016.....	174
3.2.7 Comparazione dell'evoluzione del modulo di elasticità E per tutte le prove realizzate con BTJASPE.....	180
4. Conclusioni.....	182
4.1 Prospettive	185
Bibliografia.....	187
APPENDICE	190

1. Premessa

In questi anni i progressi fatti in ambito progettuale nell'ingegneria civile hanno permesso la realizzazione di strutture sempre più grandi e sempre più snelle, e quindi l'esigenza di avere materiali adeguati a tal fine.

Da qui la comparsa di materiali innovativi, spesso però più soggetti a problemi di durabilità rispetto ai calcestruzzi realizzati « a regola d'arte ».

E' per questo motivo che si ritiene indispensabile, tra i vari aspetti analizzabili, uno studio approfondito della fessurazione del calcestruzzo giovane (jeune âge), in quanto questa comporta non solo problemi estetici ma va ad intaccare la durabilità dell'opera stessa.

In questo stage, svoltosi presso il « Laboratoire Central des Ponts et Chaussée » – LCPC- di Parigi, recentemente rinominato IFSTTAR, si é scelto di analizzare il comportamento di un calcestruzzo ordinario giovane, sia dal punto di vista termico che meccanico, e quindi sono stati prese in considerazione anche le problematiche relative a ritiro.

I parametri che sono stati utilizzati nello studio del comportamento del calcestruzzo giovane, sono, oltre ai tipi di ritiro endogeno e termico, il coefficiente di espansione termica (CDT), il modulo di elasticità, il coefficiente di Poisson ed il comportamento del materiale stesso a fluage e a rilassamento.

Come si vedrà meglio in seguito, lo studio di questi elementi é stato eseguito con un macchinario detto BTJASPE il cui funzionamento é già stato accertato con delle prove di monitoraggio relative al modulo di elasticità di un provino in calcestruzzo giovane dall'Ing. Claude Boulay, e i cui risultati sono stati esposti in un congresso a Edimburgo nel giugno 2010.

In origine BTJASPE è stato ideato perché si aveva la necessità di comparare un sistema ad ultrasuoni per il monitoraggio della presa (sensibile quindi alla rigidità del materiale) con una tipologia di prova più “classica”, con lo scopo di individuare il più precisamente possibile l'istante di presa.

Quest'ultimo infatti, permette di contraddistinguere l'inizio di evoluzione del modulo di elasticità del materiale, e quindi poter individuare l'istante in cui le misure di deformazione endogena effettuate, per un calcestruzzo giovane, possano essere considerate valide. Le misure infatti sono prese fin da poche ore dal getto, ma iniziano ad avere un significato reale nel momento in cui il modulo di elasticità inizia a evolvere in maniera decisiva.

Sembra infatti che il macchinario sopra citato abbia un potenziale di utilizzo che va al di là del solo scopo per cui è stato creato. In questo stage quindi si cercheranno di esplorare e dimostrare le capacità di BTJASPE in parallelo al monitoraggio delle caratteristiche del calcestruzzo giovane non ancora studiati.

Come primo obiettivo ci si è prefissati lo studio e soprattutto il disaccoppiamento dei ritiri endogeno e termico. Poiché il macchinario in questione è senza dubbio in grado di misurare il ritiro endogeno, ci si è concentrati sulle misure di quello termico. Il coefficiente di dilatazione termica e l'analisi termica del materiale stesso sono quindi stati i primi argomenti affrontati.

Dal punto di vista meccanico invece, si sono affrontati sia il comportamento elastico che visco-elastico del materiale (modulo di elasticità, coefficiente di Poisson, fluage e rilassamento), sia con un approccio sperimentale che con modellizzazione.

Il lavoro di stesura di tesi si articola in due parti fondamentali: una relativa alla caratterizzazione termica e l'altra alla caratterizzazione meccanica. In ciascuna delle due parti dapprima sarà presentata una breve bibliografia sugli argomenti che poi saranno trattati nella parte sperimentale.

Parte dei risultati in seguito riportati sono stati esposti in una conferenza di livello internazionale [Boulay, Crespini et al. "Monitoring of the Creep and Relaxation Behavior of Concrete since Setting Time, part 1: Compression", CFRAC Barcellona, 8-10 Giugno 2011].

2. Caratterizzazione termica del materiale

In questa parte si presenta la caratterizzazione termica di un calcestruzzo giovane di tipo ordinario.

Nel caso specifico, dopo aver testato la sensibilità dei macchinari che verranno utilizzati e la bontà dei risultati forniti, si indagherà su molteplici aspetti della caratterizzazione termica, tra i quali il coefficiente di dilatazione termica.

Quel che si vuole sottolineare è come tutta la caratterizzazione sarà fatta su un calcestruzzo giovane, cosa che rende le prove sperimentali attuate “originali”: non c'è molto materiale presente in letteratura sull'argomento.

Come già brevemente accennato nell'introduzione, prima di presentare le prove effettuate, verrà riportata una breve parte bibliografica, riguardante gli argomenti che verranno affrontati nella parte sperimentale.

2.1 Bibliografia

2.1.1 Il ritiro: struttura del calcestruzzo e meccanismi all'origine del fenomeno

2.1.1.1 Introduzione

Come accennato nella premessa, l'uso di nuove tipologie di calcestruzzo, come ad esempio sono i calcestruzzi ad alta resistenza, più sensibili di quelle ordinarie a problemi di fessurazione, porta alla necessità di una conoscenza approfondita riguardante questa tematica.

Si può individuare come principale responsabile della fessurazione il ritiro impedito, che può avvenire sia prima che dopo a presa.

Il problema della fessurazione infatti, oltre a portare sgradevoli conseguenze estetiche, provoca la riduzione della durabilità della strutture stesse. Le fessure, infatti, se di dimensioni pronunciate, permettono l'intrusione di agenti aggressivi, che vanno ad intaccare le armature e ne aumentano la velocità di corrosione.

È per questo ad esempio, che quando si verifica il cemento armato, si presta attenzione all'apertura delle fessure, limitandola a 0,2-0,3 millimetri.

Ovviamente il grado di fessurazione e soprattutto l'apertura della fessure stesse sono controllabili con diversi accorgimenti, come l'utilizzo di film per evitare l'evaporazione o delle cure ad acqua o ancora tramite aumento dell'armatura stessa.

Nonostante il ritiro stesso possa essere considerato un fenomeno semplice, a cui corrisponde una contrazione volumetrica, in realtà in questo fenomeno entrano in gioco delle dinamiche che a prima vista non sono così facilmente individuabili e comprensibili, e che in questa sede si cercherà di analizzare.

Spesso con il termine ritiro si tende ad individuare il ritiro per essiccazione, ma in realtà questo termine è comprensivo di fenomeni ben più ampi della perdita d'acqua in superficie del calcestruzzo stesso. Più che di ritiro si dovrebbe parlare di deformazione.

Secondo la letteratura, si possono individuare cinque forme di ritiro o di deformazione :

- per essiccazione
- endogeno
- termico
- plastico
- reazioni interne (reazioni alcali, solfati, carbonatazione)

Con il termine di ritiro totale dunque, si identifica la contrazione di volume dovuta alle precedenti forme di ritiro stesso, che possono svilupparsi in sequenza o contemporaneamente nel calcestruzzo stesso.

Con ritiro per essiccazione si intende la contrazione di volume del pezzo di calcestruzzo al momento della maturazione, per la perdita d'acqua contenuta nei capillari della pasta di cemento idratata, a partire dalle parti esposte all'aria.

Il ritiro endogeno, invece, è un fenomeno che è diretta conseguenza del fenomeno dell'idratazione. La stessa dipendenza dal fenomeno di idratazione è rilevabile per il ritiro termico, in calcestruzzi non trattati termicamente, in quanto il calore dovuto alla reazione esotermica dell'idratazione, provoca gradienti di temperatura nel materiale.

Il calcestruzzo dapprima caldo si va a raffreddare. Durante la fase di raffreddamento, quindi, la rigidità del materiale è ancora modesta e gli sforzi che si vanno a creare sono di compressione e non elevati. Quando il pezzo si raffredda, invece, la rigidità inizia ad essere importante e le tensioni sono di trazione ed elevate. In questa fase il rischio di fessurazione è elevato.

Quando invece il calcestruzzo è ancora allo stato plastico e quindi prima della presa, la perdita d'acqua per evaporazione o assorbimento, comporta il cosiddetto ritiro plastico.

Infine si ha il ritiro per carbonatazione, dovuto alla reazione della pasta di cemento idrata con il biossido di carbonio dell'aria, in presenza di umidità.

La presenza di un tipo di ritiro in un calcestruzzo non esclude la presenza degli altri; esistono infatti dei fattori che possono essere causa comune di più tipi di ritiro (come ad esempio il calore) e che quindi portano alla coesistenza di più tipologie.

Dopo la descrizione sommaria di ciascuno di questi tipi di ritiro, ci si concentrerà sullo studio più approfondito di cause e conseguenze di ritiro endogeno e termico, in quanto più rilevanti per il comportamento di un calcestruzzo giovane.

Quest'ultimo è definito in generale, come un calcestruzzo nel periodo che va dal contatto e quindi dalla reazione acqua-cemento al momento della maturazione di circa 7 giorni. (si può individuare, volendo, un'altra categoria di calcestruzzo "molto giovane" corrispondente al materiale che è nelle sue prime 24 ore di vita).

Come sarà visto nello specifico in seguito, i dati ottenuti dalle prove sono stati considerati significativi a partire da un periodo di circa 5 ore dopo il getto; ciò perché le misure che sono state effettuate sono di tipo lineare e non volumetrico. È infatti necessario, per la validità di queste misure, avere un calcestruzzo con forma propria, e che quindi la singola misura lineare registrata sia rappresentativa anche del comportamento nelle altre direzioni.

Il materiale in questione è in questo caso considerato omogeneo ed isotropo.

2.1.1.2 La reazione di idratazione

Per comprendere i fenomeni e le dinamiche relative ai ritiri endogeno e termico, è assolutamente indispensabile conoscere nel particolare le caratteristiche di ciò che li causa: la reazione di idratazione.

Con reazione di idratazione viene indicata quella serie di fenomeni chimico-fisici che hanno luogo quando l'acqua e il cemento vengono a contatto.

In seguito verranno descritte brevemente le dinamiche di questo fenomeno al fine di una migliore comprensione delle conseguenze che comporta per il ritiro stesso.

Il cemento Portland, il più comunemente utilizzato per la fabbricazione del calcestruzzo, è composto da una miscela di calcare ed argille, che viene cotta ad alta temperatura per poi essere raffreddata velocemente, così da ottenere la formazione di un materiale detto clinker.

Il clinker quindi viene macinato finemente, apportando alla sua composizione delle piccole percentuali di gesso, per avere una velocità di presa più controllata.

Il prodotto finale ottenuto da questo secondo processo descritto è la cosiddetta polvere di cemento.

Il cemento Portland è quindi costituito essenzialmente da quattro fasi, quali alluminato tricalcico, silicato tricalcico, silicato bicalcico e ferro alluminato tetracalcico. Nelle trattazioni chimiche inerenti all'argomento, le quattro fasi sono dette rispettivamente: C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF .

Queste fasi si trovano nella composizione di un cemento portland ordinario, circa nelle percentuali:

composizione mineralogica	
C_3S	52,0 %
C_2S	20,0 %
C_3A	11,0 %
C_4AF	7,0 %

Tabella 1.1: composizione mineralogica di un Cemento Portland ordinario

Le quattro fasi sono molto importanti in quanto entrano direttamente in gioco nella reazione di idratazione del cemento; ciascuna infatti, ha una reazione propria con l'acqua che porta a delle ripercussioni sulla pasta stessa.

Non appena l'acqua viene aggiunta alla polvere di cemento, infatti, si ha un'immediata reazione di idratazione tra la fase denominata con C_3A e l'acqua; questa oltre a causare un notevole sviluppo di calore, porta alla formazione di un ossido complessato, di cui non entriamo nel dettaglio con il bilancio chimico.

Quel che è importante sottolineare è che questa reazione comporterebbe una presa troppo rapida della pasta, con l'ottenimento di proprietà meccaniche molto scadenti; è per questa ragione che si aggiunge, durante la macinazione de clinker, della polvere di gesso, come regolatore dei tempi di presa.

Con l'aggiunta di gesso, infatti, si ha la formazione dell'ettringite, materiale che va a ricoprire i grani di cemento, impedendo di fatto il contatto diretto con l'acqua, e quindi rallentando la loro idratazione.

Le reazioni di idratazioni successive sono quelle che si hanno tra acqua, C_3S e C_2S e portano all'ottenimento delle proprietà meccaniche che caratterizzano il calcestruzzo vero e proprio. Queste due reazioni, benché comportino lo sprigionarsi di grandi quantità di calore, sono molto più lente della prima reazione citata, e il loro tempo utile di fine e raggiungimento delle proprietà meccaniche desiderate è dell'ordine di mesi; dopo 28 giorni infatti la reazione di idratazione con C_3S comporta il raggiungimento del 70% delle proprietà meccaniche finali, mentre per quanto riguarda la reazione con C_2S dopo 6 mesi si ha il raggiungimento dei due terzi delle proprietà meccaniche definitive.

Vista comunque la grande quantità di C_3S nel cemento, si ha che la fase di idratazione riguardante questa componente controllerà in gran parte la cinetica globale dell'idratazione di tutto il cemento, almeno durante le prime ore.

Per quanto riguarda l'ultima fase, quella indicata con C_4AF , si può dire che la sua reazione con l'acqua non causa grosse conseguenze a livello di tempi di presa, ma porta all'ottenimento del tipico colore grigiastro del calcestruzzo.

L'idratazione del cemento può essere quindi decomposta in 5 fasi, che saranno brevemente analizzate e che sono schematizzate in figura 1.1.

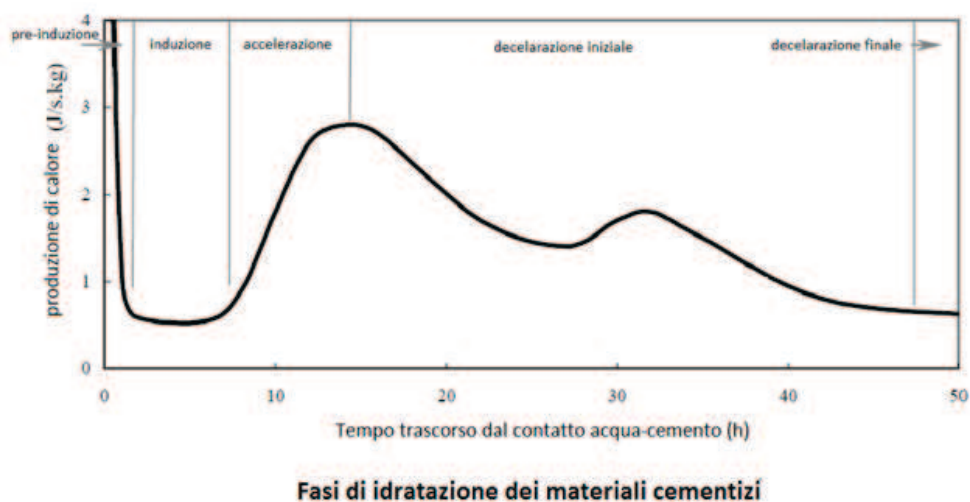


Figura 1.1

Nella sua tesi, [Charron,2003] descrive il fenomeno della presa e quindi le fasi che la compongono nel seguente modo:

- 1- Pre - induzione: è una fase dell'idratazione che dura qualche minuto e porta ad un leggero aumento di temperatura. È importante dire come in questa fase si abbia la dissoluzione di alcune componenti del cemento, quali C_3S e C_3A nella soluzione interstiziale, fatto che porta un aumento della conducibilità del cemento stesso a causa della presenza di ioni nella soluzione acquosa. La presenza quindi di queste componenti porta alla reazione immediata con l'acqua e alla formazione di idrati che vanno ad avvolgere i grani e quindi impediscono la dissoluzione ulteriore delle componenti del cemento, rallentando di conseguenza il processo di idratazione. Si ha l'inizio quindi della fase di induzione.
- 2- Induzione: è una fase che dura qualche ora e non comporta aumenti significativi di temperatura. Si ha sempre la dissoluzione delle fasi di cemento nell'acqua, ma il ritmo è estremamente più lento, fatto che porta al progressivo aumento di ioni calcio e idrossido (C_2A^+ e OH^-) nella soluzione acquosa, finché il livello di concentrazione raggiunto non è quello critico, con il quale ha inizio la fase di accelerazione.
- 3- Accelerazione: la concentrazione critica degli ioni sopra citati, porta alla loro precipitazione sotto forma di portlandite, il che comporta un abbassamento delle quantità di ioni nella soluzione. Ciò implica l'inizio della dissoluzione degli idrati che coprono i grani di cemento e dunque l'idratazione può aumentare la sua velocità di sviluppo. Si raggiunge in questo modo la massima velocità di idratazione e di conseguenza lo sviluppo di una notevole quantità di calore. Con l'avanzamento dello stato dell'idratazione quindi, si ha la continua formazione di idrati, che portano ad avere una struttura sempre più rigida nel calcestruzzo. Di conseguenza è proprio in questa fase dell'accelerazione che si ha la presa.

- 4- Decelerazione iniziale: ha inizio quando il calore sviluppato durante la fase precedente si attenua e dura qualche giorno. La decelerazione è sempre dovuta al fatto che gli idrati, in quantità sempre crescente, formano degli strati che vanno a ricoprire i grani di cemento tanto da andare a riempire anche le porosità; ciò comporta un rallentamento della dissoluzione dei grani anidri; inoltre i siti di nucleazione si fanno sempre più radi. Il meccanismo di idratazione rallenta. Il grado di umidità relativa interna diminuisce (a causa dell'autoessiccazione) e al di sotto di un certo valore (80% secondo [Powers, 1948]), la reazione di idratazione termina. Secondo [Baroghel Bouny, 1994], l'acqua assorbita continua a essere consumata, ma la reazione è molto più lenta.

- 5- Decelerazione finale: si necessita di qualche anno per consumarsi e termina quando gli ultimi grani di cemento anidro sono completamente idratati. Il calore sviluppato è comunque bassissimo.

Il risultato di questo tipo di reazione di idratazione quindi è la formazione di una pasta di cemento idrata, che sarà poi quella che conferirà lo sviluppo della resistenza del calcestruzzo stesso, con una sua relativa perdita di volume e lo sviluppo di calore.

Quindi si ha un legame indissolubile tra resistenza, diminuzione di volume e produzione di calore.

2.1.1.3 Il ritiro endogeno

Il ritiro endogeno è una forma di ritiro che si ha quando la temperatura è costante e non ci sono scambi di alcun tipo con l'ambiente circostante; ciò non implica però che, qualora non siano rispettate le condizioni sopra citate, non si abbia ritiro endogeno. Questo tipo di ritiro infatti è una diretta conseguenza della reazione di idratazione, e quindi si verifica sempre e non è "eliminabile".

Il non avere infatti temperatura costante e perfetto isolamento dall'ambiente, comporta avere il manifestarsi di altri tipi di ritiro, come ad esempio quello termico o quello per essiccazione, oltre a quello endogeno.

Si analizzeranno quindi in questo paragrafo modalità di sviluppo e conseguenze di questo tipo di ritiro, perché ha un ruolo fondamentale nelle dinamiche di comportamento del calcestruzzo giovane.

Prima di entrare nei dettagli questo tipo di ritiro, sarà conveniente dare delle definizioni [BENTUR,2002] per i termini che verranno utilizzati nelle seguenti pagine:

Ritiro chimico: Questo tipo di ritiro, comunemente chiamato anche “contrazione di Le Chatelier”, è una riduzione di volume a livello microscopico, dovuta al fatto che il volume assoluto dei prodotti di idratazione è più piccolo della somma dei volumi dei materiali reagenti, di acqua e di cemento.

Ritiro endogeno: È il ritiro a livello macroscopico del volume di calcestruzzo a causa della reazione di idratazione. È come si vedrà legato al ritiro chimico in quanto l’uno diretta conseguenza dell’altro, ma i due fenomeni devono essere considerati separatamente.

Ritiro esterno: Corrisponde alla diminuzione di volume apparente dei materiali cementizi, osservato su scala macroscopica. È quello che è dato dalla somma del ritiro dovuto all’idratazione e di quello dovuto all’essiccazione del materiale.

Poiché nella trattazione si è scelto di non approfondire il tema del ritiro per essiccazione, il ritiro esterno sarà dovuto solamente alla componente causata dall’idratazione.

Autoessiccazione: È l’essiccazione interna del materiale causata dalla reazione di idratazione. Questa infatti provoca una diminuzione del tenore d’acqua nei pori con la formazione di volume gassoso, secondo le modalità che saranno descritte più approfonditamente in seguito.

Volume assoluto: composto dalla somma delle fasi liquida e solida

Volume apparente: composto dalla somma delle fasi liquida, solida e gassosa

All'inizio della reazione di idratazione dunque, i grani di cemento sono omogeneamente dispersi nella pasta, e mano a mano che l'idratazione prosegue nel tempo, si ha una consumazione dell'acqua di impasto.

Sperimentalmente si è visto come il bilancio volumico della reazione di idratazione sia negativo, implicando quindi una riduzione del volume della pasta di cemento che si è venuta a formare. Questa contrazione è detta "contrazione di Le Chatelier" ed è pari a una diminuzione di circa 8-10% del volume totale dei reagenti, acqua e cemento. [Boivin, 2001]

È importante sottolineare come questo fenomeno di contrazione chimica sia inevitabile, in quanto conseguenza diretta dell'idratazione.

La contrazione di Le Chatelier, e quindi la diminuzione di volume assoluto della pasta, inizia sin da quando i primi grani di cemento reagiscono con l'acqua, ma è possibile distinguere 3 fasi di stato della pasta stessa per capire meglio come si arriva al fenomeno dell'autoessiccazione e quindi alla distinzione tra ritiro chimico ed endogeno.

Possiamo vedere le conseguenze della contrazione in questione sia in scala microscopica che a livello strutturale, come rappresentato rispettivamente in figura sottostante:

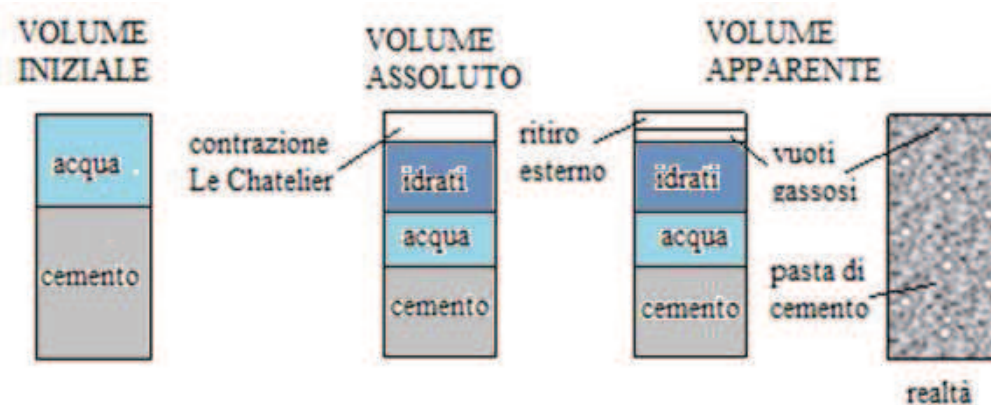


Figura 1.2

Dalla precedente schematizzazione (Figura 1.2) si può vedere come la differenza sostanziale tra volume assoluto e volume apparente stia nel fatto che il primo non tiene conto, per la valutazione della contrazione, della formazione di vuoti gassosi, mentre il secondo sì.

È per questo motivo che se si mettono a confronto le diminuzioni di volume date dai due tipi di ritiro, il ritiro chimico e quindi la contrazione di Le Chatelier comporterà una contrazione maggiore del ritiro endogeno, come rappresentato nel grafico sottostante:

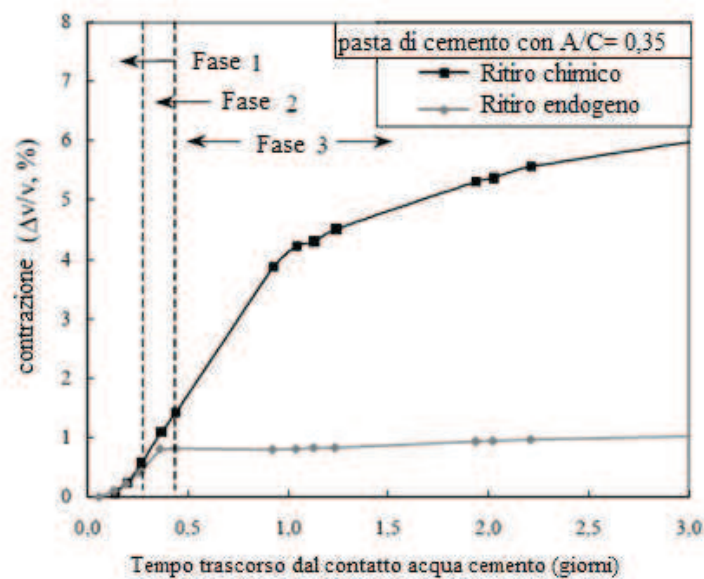


Figura 1.3

Nel precedente grafico si nota la distinzione tra tre fasi caratterizzanti il periodo dopo il contatto acqua-cemento. Queste sono molto importanti per contrassegnare e distinguere ciò che accade a livello microscopico nella pasta di cemento, e quindi poi a livello macroscopico con il ritiro vero e proprio. È riportata quindi di seguito una descrizione delle fasi, con l'aiuto di alcune immagini per rendere più facile la comprensione.

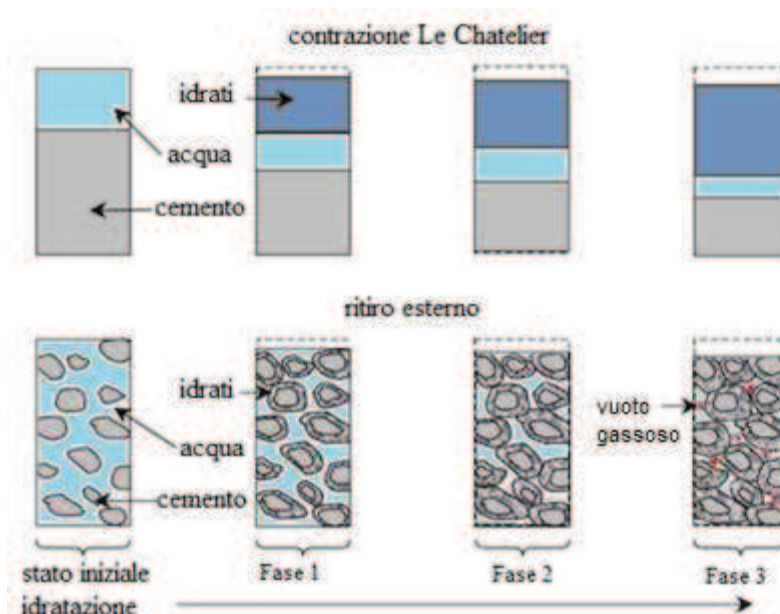


Figura 1.4

Come si vede dalla Figura 1.4, all'inizio quindi dell'idratazione i grani di cemento sono dispersi uniformemente e l'acqua inizia a reagire con essi. Le seguenti tappe del processo in questione sono state messe in evidenza sperimentalmente da [Sellevold,1992]:

1° fase: si iniziano a formare intorno ai grani stessi gli idrati, ma non sono abbastanza rigidi da opporsi alla diminuzione di volume della pasta. È importante sottolineare come in questa fase le variazioni di volume apparente e assoluto siano confuse, in quanto la contrazione della pasta può avvenire liberamente.

Come si può facilmente capire il passaggio da stato liquido a solido della pasta di cemento, è di fondamentale importanza per i tipi di ritiro di cui si sta parlando e, come verrà in seguito approfondito, del fenomeno di autoessiccazione.

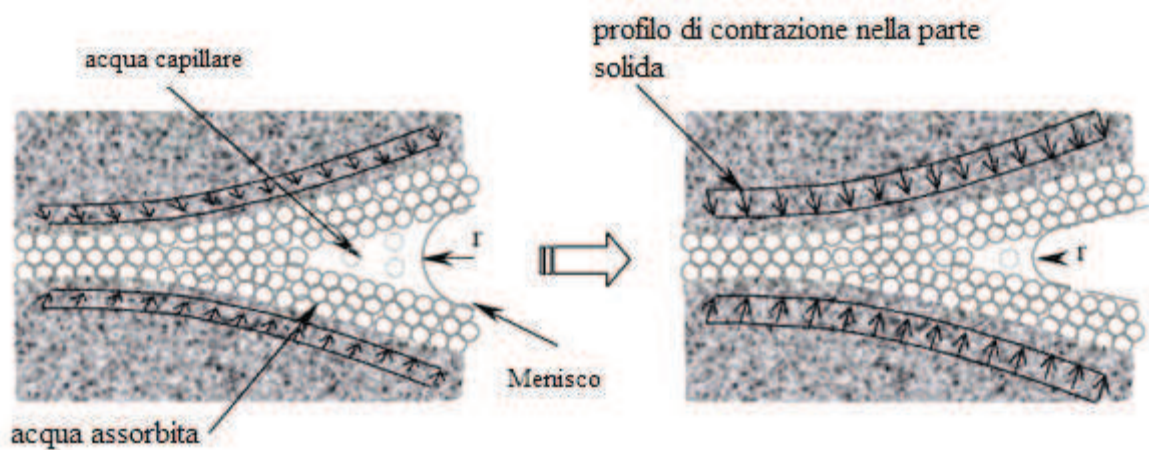
Vale la pena quindi di approfondire brevemente questo aspetto: il passaggio tra liquido e solido si ha in 4 momenti.

La Sospensione, è il momento caratterizzato da grani solidi di cemento sconnessi tra loro e dispersi in una fase liquida continua. È questa la fase in cui si può verificare l'essudazione del materiale, con affioramento in superficie dell'acqua di miscelazione e parte fina, e assestamento sul fondo degli inerti.

Segue la Sospensione la Coagulazione, che comporta una rapida aggregazione dei grani, provocata dalla forza superficiali di Wan der Walls. La Presa quindi comporta lo sviluppo di idrati, che avvolgono i grani di cemento, e si ha la formazione di masse che si legano tra loro fino a che si può individuare un cammino continuo di grani meccanicamente legati. Con il procedere dell'idratazione queste connessioni aumentano, diventando sempre più forti, il che comporta avere una rigidità crescente. Infine si ha l'Indurimento, che porta ad avere una fase solida sempre più presente e di conseguenza una rigidità sempre più crescente, una riduzione del tenore d'acqua e una capillarità sempre più fine a causa del continuo formarsi di idrati che progressivamente riempiono i capillari.

2° fase: con l'avanzare del processo di idratazione e la formazione degli idrati, si ha lo sviluppo della rigidità del materiale e le variazioni di volume imposte dalla contrazione della pasta iniziano ad essere impedito dallo scheletro minerario nascente. Qui si inizia ad avere un discostamento tra contrazione del volume assoluto e apparente e quindi tra ritiro chimico e ritiro endogeno. Ciò è ben visibile in una pasta di cemento e meno sul calcestruzzo vero e proprio.

3° fase: infine, durante la fase di indurimento, il progredire della reazione di idratazione porta a dei legami sempre più forti che implicano una rigidità crescente, accompagnata da una riduzione del tenore d'acqua e da una capillarità sempre più fine dovuta al fatto che gli idrati vanno progressivamente a riempire i capillari. Lo scheletro minerario è ben formato e si oppone alla contrazione chimica; in questa fase dunque le diminuzioni di volume dovute all'idratazione non sono più compatibili con quelle meccaniche permesse dallo scheletro. C'è allora la comparsa di volume gassoso nella porosità capillare, che inizialmente era saturata d'acqua. L'aumento di porosità è accompagnato da una diminuzione dell'umidità relativa interna. Ciò comporta l'apparizione di menischi (zone di interfaccia gas-liquido) nella pasta, che implica un aumento della pressione nella fase liquida e una conseguente forza di compressione sullo scheletro, mano a mano che la reazione di idratazione consuma l'acqua contenuta nei pori. Il raggio di curvatura del menisco stesso diminuisce. In scala macroscopica ciò comporta un'ulteriore contrazione della pasta.



Quando il raggio di curvatura del menisco diminuisce, lo scheletro degli idrati si contrae.

Figura 1.5 Meccanismo di depressione capillare [Charron,2003]

Nella terza fase, come è chiaramente visibile nel grafico riportato in Figura 1.5, la differenza tra i due ritiri è enorme, in quanto, il ritiro endogeno, misurato in scala microscopica, tiene conto della formazione dei vuoti gassosi e della diminuzione quindi del tenore d'acqua nelle porosità; il ritiro chimico, invece, su scala macroscopica, tiene conto della semplice diminuzione di volume esterno. In questa fase la differenza tra ritiro chimico e ritiro endogeno è evidente; la contrazione esterna infatti oltre ad essere minore di quella a livello chimico, è anche molto più lenta.

Il ritiro endogeno quindi non è evitabile, in quanto strettamente legato alla reazione di idratazione; esso inoltre, interessa omogeneamente tutto il volume del materiale. Sui calcestruzzi con rapporti acqua/cemento (a/c) bassi, nello specifico inferiori a 0,42, come è il caso dei calcestruzzi ad alta resistenza, il ritiro endogeno è più elevato.

2.1.1.4 Il ritiro termico

Per calcestruzzi non trattati termicamente, com'è quello considerato nella trattazione, il ritiro termico si ha per la creazione di gradienti di temperatura a causa del calore prodotto dalla reazione di idratazione.

Nei pezzi massicci di calcestruzzo questo tipo di ritiro è più importante che nei pezzi sottili, in quanto, chiaramente, la differenza di temperatura tra esterno e cuore diventa più pronunciata. Questo gradiente provoca all'interno del calcestruzzo dei deformazioni differenziali. Il ritiro che ne è generato e la conseguente fessurazione, per calcestruzzi ordinari, è ritenuto inesistente per spessori minori di 50 cm ed inevitabile per spessori maggiori di 80 cm.

Nel corso del raffreddamento post-presa, inoltre, la “pelle” del pezzo, a contatto con l'ambiente esterno, subirà un raffreddamento più veloce della parte interna del calcestruzzo; la pelle sarà quindi sottoposta a tensioni di contrazione, mentre il cuore a compressione. Il fenomeno è accentuato nel momento in cui vengono tolte le casseforme [Kovler,1995]. Se la resistenza a trazione del calcestruzzo è inferiore alle contrazioni di trazione in superficie, si avrà la formazione di fessure sulla “pelle”.

Il raffreddamento si considera più problematico rispetto al surriscaldamento per quanto riguarda questo tipo di fessure in quanto la pasta più rigida. Con il riscaldamento, invece le fessure potrebbero anche richiudersi visto che la pasta è più morbida. Il raffreddamento inoltre, avviene a reazione di idratazione in stato avanzato, il che implica avere un modulo di Young più elevato e quindi il nascere di sforzi più importanti.

Questo tipo di ritiro è molto importante in calcestruzzi ad alte prestazioni, in quanto hanno un calore di idratazione e una cinetica di idratazione più elevate dei calcestruzzi ordinari e quindi possono avere problemi per ritiro termico anche con spessori al di sotto di 30 cm.

Tra i fattori aggravanti di questo ritiro possono essere compresi, oltre alla dimensione elevata dei pezzi, anche un dosaggio troppo elevato di cemento o il fatto che una faccia sia termicamente isolata e le altre no o ancora che il ritiro sia impedito o comunque limitato, anche a causa di riprese di getto.

Bisogna quindi agire in modo tale da evitare gli scarti elevati di temperatura tra le varie zone, cosa che si può ottenere tramite cure ad acqua o nebulizzazione e cercando una composizione della miscela ottimale per il calcestruzzo.

Dopo aver quindi spiegato cause e “scenari” di ritiro endogeno e termico, si cercherà di fornire delle spiegazioni sul coefficiente di dilatazione termica (CDT), principale parametro su cui si è indagato nelle prove sperimentali vere e proprie.

Come si avrà modo di vedere successivamente nelle prove che sono state eseguite, il ruolo occupato dal ritiro è marginale rispetto a quello che avrà il coefficiente di dilatazione termica.

Tuttavia si è ritenuta necessaria una trattazione riguardante il ritiro in quanto, soprattutto quello termico, legato al coefficiente di dilatazione termica analizzato in seguito.

Per capire infatti tutte le dinamiche di sviluppo di questo coefficiente e le modalità utilizzate nel calcolo, è necessario conoscere nel dettaglio il fenomeno del ritiro. In effetti per il calcolo del coefficiente di espansione si è ricorsi alla separazione dei ritiri endogeno e termico, essendo solo il secondo implicato nella corretta valutazione del CDT.

2.1.2 Coefficiente di dilatazione termica

2.1.2 .1 Introduzione

Nel calcestruzzo giovane, come accennato precedentemente, la causa maggiore di fessure è il cosiddetto stress termico. Per questo motivo ultimamente si sta facendo molta ricerca in questo campo.

Il parametro che permette di correlare variazioni di calore e sforzi adottati nel calcestruzzo, è il coefficiente di dilatazione termica (CDT).

In generale si può dire che la materia, in risposta ad un cambiamento della temperatura, è portata a cambiare il proprio volume.

$$\frac{dV}{V} = \alpha \Delta\theta$$

Nella quale, la variazione relativa di volume di un solido o di un liquido, tra uno stato 1 e uno stato 2, è proporzionale alla differenza di temperatura tra i due stati. Il coefficiente di proporzionalità è il CDT volumico. Per un solido omogeneo ed isotropo, il CDT lineare è stimato essere 1/3 di quello volumico.

2.1.2 .2 Materiale in letteratura

Per calcestruzzi maturi, in letteratura si trovano dei valori di questo parametro che possono essere considerati rappresentativi. La valutazione del CDT per calcestruzzi nelle prime ore dopo il getto, presenta però, più difficoltà in quanto la natura solida del materiale è in transizione e gli effetti termici dell'idratazione sono sovrapposti a quelli non termici.

Alcune ricerche hanno fornito dei risultati che permettono di dire che il CDT sia indipendente dal tempo (Mitchell et al.,1998) , mentre altri, come si vedrà in seguito, che il coefficiente cresce leggermente con il tempo (Wittmann et al.,1974), o decresce con il tempo (Emborg, 1989).

Sta di fatto che in generale dei valori molto alti del CDT volumico, dell'ordine anche di $130 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, si hanno subito dopo la messa in opera a una temperatura di 20°C dell'impasto, fino alla presa; dopo quest'ultima invece, il coefficiente si stabilizza

raggiungendo un valore di circa $30 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (CDT lineare $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) [Laplante et Boulay, 1994].

Recenti studi [Bjontegaard e Sellevold, 2001] hanno dimostrato che il CDT decresce effettivamente fino alla presa, raggiunge un minimo al momento della presa, ed è fortemente influenzato in seguito, dal grado di saturazione nella porosità.

I valori più elevati nella fase di idratazione della pasta possono essere attribuiti alla fase acquosa presente nella miscela: siamo infatti ancora nello stato plastico del materiale ed è presente dell'acqua non legata. Inoltre si noti che l'acqua ha un valore di CDT più alto di quello del materiale solido.

Il minimo raggiunto è funzione della natura dello scheletro solido del cemento stesso (pasta di cemento ed aggregati).

Il grado di idratazione dopo la presa, sembra non avere un'influenza importante sul valore del CDT [Bjontegaard et Sellevold, 2001].

Si è dunque giunti alla conclusione che il valore assunto dal CDT è dipendente essenzialmente dal tipo di aggregati utilizzati e dal grado di idratazione dei pori della pasta.

È risaputo e dimostrato, ad esempio, che i materiali silicei, come il quarzo, siano caratterizzati in generale da valore del coefficiente del CDT elevato, mentre materiali argillosi basso.

È altresì vero che paste caratterizzate da porosità parzialmente sature forniscano valore del CDT più elevati di quelli ottenuti con porosità totalmente sature o non sature. Ciò è dimostrato nei due grafici sotto riportati e tratti da [Sellevold, Bjontegaard, 2006]

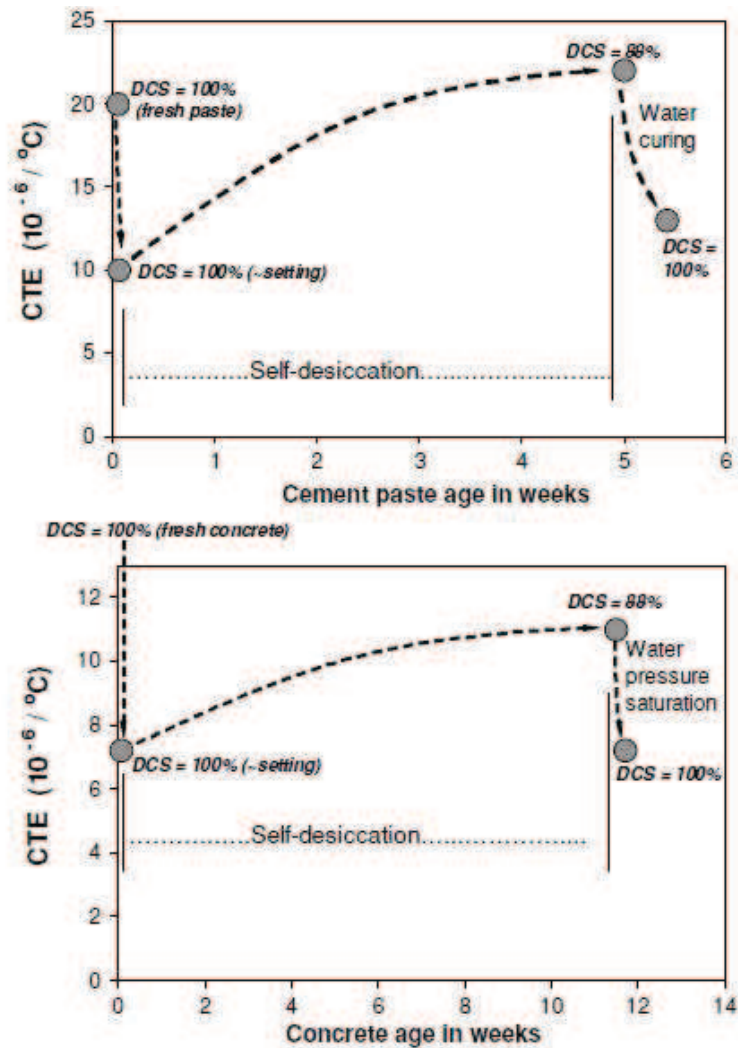


Figura 1.6

Nei grafici è riportato rispettivamente il comportamento tipico del coefficiente di espansione termica per una pasta di cemento e per un calcestruzzo, con a/c di 0,4.

Con la sigla DCS è indicato il grado di saturazione capillare, per acqua. Come si può notare quindi prima della presa entrambi i materiali hanno un coefficiente CDT elevato, che va ad abbassarsi nel momento in cui si ha la formazione dello scheletro solido del materiale e quindi in corrispondenza al momento della presa.

Come si può inoltre notare, con l'avanzare del processo di autoessiccazione, e quindi la conseguente diminuzione di tenore d'acqua nei pori, il coefficiente di dilatazione termica assume un valore più elevato. Per quanto riguarda la pasta di cemento, il CDT passa infatti da un valore di $10 \mu def / ^\circ C$ a un valore di $22 \frac{\mu def}{^\circ C}$.

Se poi la pasta è immersa in acqua, si ha nuovamente un abbassamento del CDT a $13 \frac{\mu_{def}}{^{\circ}C}$. Un comportamento analogo è rilevato per il calcestruzzo stesso. ($\mu_{def}=10^{-6}$ =microdef)

Ciò è importante per constatare l'importanza fondamentale del tenore d'acqua del materiale per la valutazione del CDT. Si noti come nel calcestruzzo l'immersione in acqua comporti il raggiungimento dello stesso valore che si raggiungeva con la presa.

La maggiore difficoltà che si riscontra nella stima del CDT sta nel fatto che le deformazioni differite si sovrappongono a quelle istantanee, in risposta ad una sollecitazione termica.

È stato dimostrato come le deformazioni differite siano molto più grandi in provini completamente saturi che in quelli che lo sono parzialmente.

Questo aspetto però non verrà approfondito in questa sede in quanto il protocollo utilizzato per la prova, come si vedrà in seguito, permette di affermare che le deformazioni registrate possono essere considerate istantanee. In effetti, poiché è chiaro che il tenore d'acqua (equilibrio liquido-vapore nei pori) gioca un ruolo importante durante delle sollecitazioni termiche, si fa l'ipotesi che la sollecitazione ciclica che sarà applicata, porterà a delle deformazioni legate all'acqua stessa, che non avranno tempo di stabilirsi.

In altre parole, si giocherà sul fatto che la cinetica delle deformazioni istantanee è più importante della cinetica delle deformazioni differite. Questa ipotesi è stata consolidata in esperienze precedenti allo studio in questione.

Per quanto concerne, però, il valore del CDT per calcestruzzi giovani, il materiale presente finora in letteratura non è molto, e anzi è caratterizzato da risultati contraddittori ed incerti, come detto in precedenza. Per questo motivo uno degli obiettivi che sono stati posti durante lo stage è stato quello di indagare le modalità di sviluppo e i valori assunti dal coefficiente in questione per un calcestruzzo molto giovane.

Si riportano in seguito le più recenti ricerche effettuate per determinare i valori del CDT, dalle quali si è partiti per effettuare le prove sperimentali nello stage.

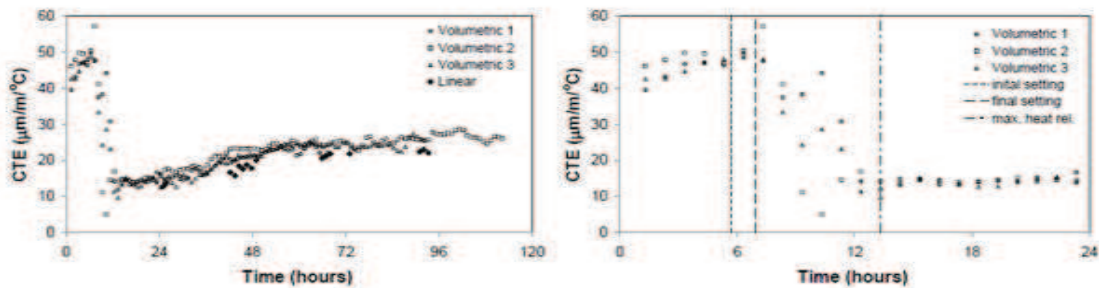
Oltre al lavoro effettuato da [Sellevold et Bjontegaard,2006], si sono seguite altre due pubblicazioni per avere più chiare le tematiche e i problemi che si sarebbero affrontati nel lavoro effettuato. [Loser et al, 2010] e [Cusson et al, 2006].

Loser et al., hanno presentato un monitoraggio dello sviluppo del CDT, realizzato sia con misure lineari che volumiche. Il tipo di cemento ordinario utilizzato ha un rapporto $a/c=0,3$.

Per quanto riguarda le misure lineari queste sono state effettuate in due paste di cemento poste in una cassaforma con temperatura ed umidità controllata. La media dei valore del CDT ricavati da queste due paste di cemento, è stata ritenuta rappresentativa del comportamento del coefficiente in questione, misurato linearmente.

Le misure volumetriche invece sono state effettuate con l'utilizzazione del principio di Archimede: la pasta di cemento è stata posta all'interno di una sottile membrana plastica che a sua volta è stata immersa in un liquido a temperatura controllata. Con il variare della temperatura del liquido e quindi anche della temperatura interna del provino, il volume della pasta stessa subisce delle variazioni. Queste variazioni di volume cambiano il valore della spinta di Archimede, che è rilevata da una bilancia, collegata al provino stesso.

Il procedimento comunque non si è dimostrato così semplice, in quanto il cambiamento di massa è funzione del cambiamento di densità del liquido di galleggiamento, indotte dalle variazioni della temperatura del liquido stesso.



Coefficient of thermal expansion of Portland cement paste with w/c 0.3 in the first 5 days of hydration and zoom in on the first 24 hours

Figura 1.7

Nel grafico di sinistra sono riportate le tre misure volumetriche effettuate e quella lineare.

Le misure volumetriche risultano leggermente più alte di quelle che si ottengono linearmente. Ciò che risulta più interessante è riportato nel grafico a destra: l'andamento del CDT nelle prime 24 ore dal getto. Sono messi in evidenza i tempi di inizio e fine presa e il picco di massimo rilascio di calore.

Da entrambi i grafici si constata l'andamento di cui già si è parlato in precedenza: il CDT risulta molto alto non appena il calcestruzzo è gettato e va via via abbassandosi fino al momento della presa. Dopo la presa, il coefficiente in questione si stabilizza, fino a un tempo di 24 ore, presentando la tendenza ad avere piccole variazioni, che fanno sì che si possa ritenere costante. Si ha poi un aumento del coefficiente nel periodo compreso tra 24 o 100 ore.

Questa tendenza sarà verificata nelle prove sperimentali effettuate nello stage, presentate successivamente.

Nel secondo lavoro [Cusson et al, 2006], è presentato un approccio sperimentale per determinare il CDT di calcestruzzo giovane.

Tre prismi di grandi dimensioni ($75 \times 75 \times 295 \text{ mm}^3$) di calcestruzzo, sigillati, sono sottoposti a dei cicli di temperatura di $25\text{-}30^\circ\text{C}$. L'esempio del ciclo-tipo eseguito è riportato nell'immagine sottostante:

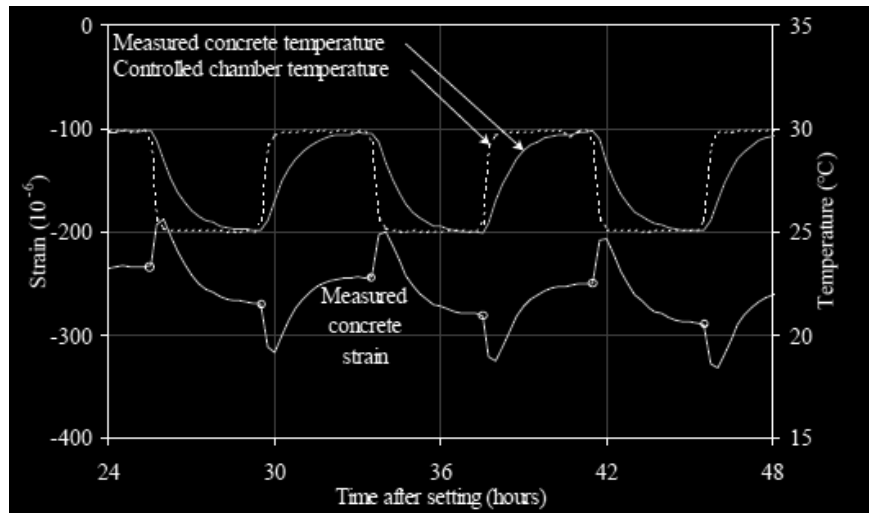


Figura 1.8

I dati sono stati registrati dal momento di inizio presa ad un'età del calcestruzzo di 7 giorni.

Le deformazioni del calcestruzzo sono state rilevate con sensori di spostamento ad alta precisione e le temperature misurate con termocoppie.

Si è scelto di concentrarsi ed approfondire questo lavoro perché, come verrà meglio visto in seguito, presenta circa la stessa procedura utilizzata nello stage per la valutazione del CDT.

Si ricorda comunque che il calcestruzzo utilizzato in questa prova è ad alte prestazioni ($a/c = 0,35$) e quindi i valori del CDT saranno differenti da quelli che si sono ritenuti indicativi per i calcestruzzi comuni.

I calcestruzzi ad alte prestazioni, infatti, hanno un alto dosaggio di cemento e un rapporto a/c solitamente basso, il che implica ad esempio un forte calore di idratazione e di conseguenza uno stress termico per il materiale più elevato.

Il minimo raggiunto al momento della presa è senza dubbio dovuto alla natura degli aggregati.

Dai risultati ottenuti, infatti, si può vedere come il valore minimo del CDT ottenuto sia di $6\mu def/^\circ C$ dopo il giorno dal getto e il massimo di circa $8\mu def/^\circ C$, dopo 4 giorni; successivamente il valore del coefficiente sembra evolvere più lentamente.

Questo andamento è da considerarsi legato al fenomeno dell'autodessicazione. Sarebbe comunque utile in questo caso avere una registrazione del CDT più a lunga durata.

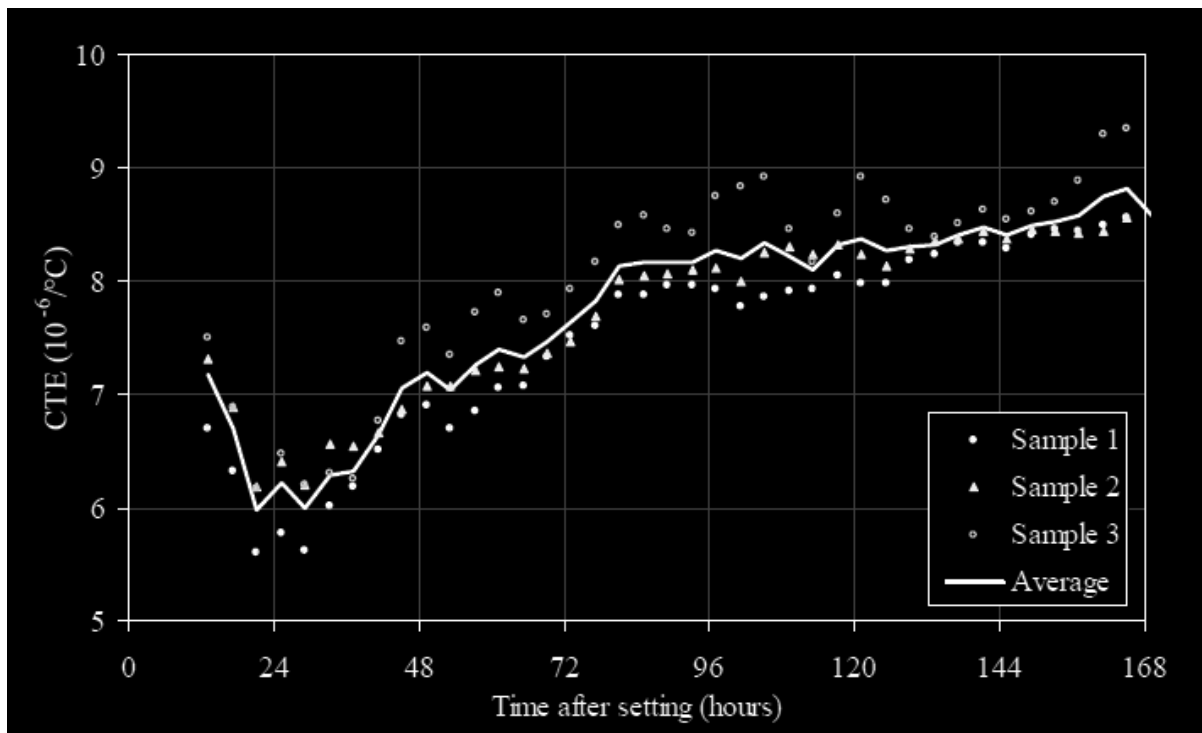


Figura 1.9

Per lo studio del CDT in questo caso, si è isolato il contributo termico della deformazione dalla deformazione totale stessa. Per fare ciò gli autori hanno effettuato una media delle deformazioni totali sull'ampiezza di un ciclo (moyenne glissante).

Ciò che ne è risultato è rappresentato nel grafico sottostante:

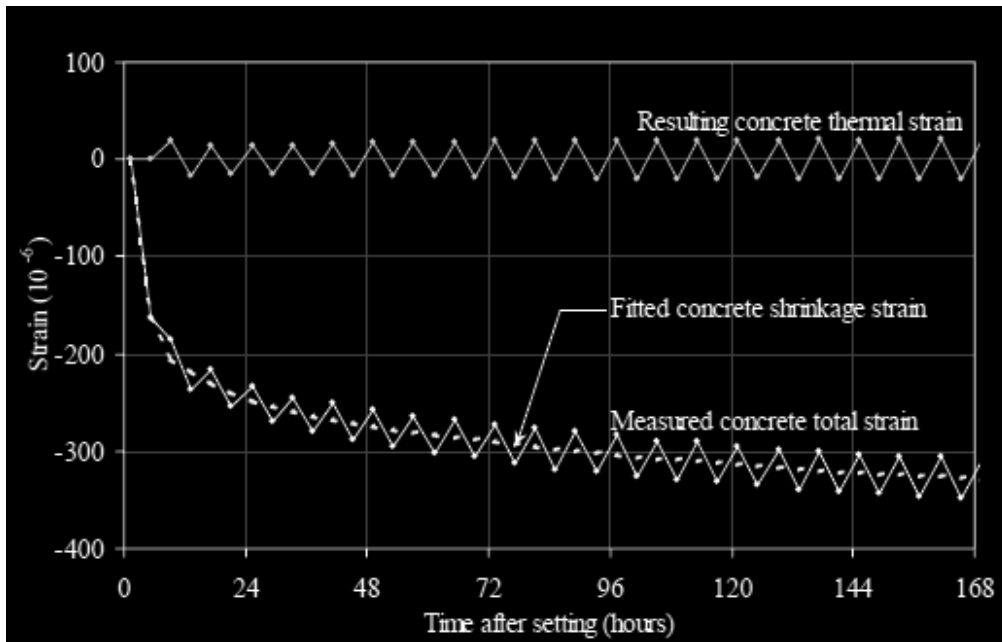


Figura 1.10

Questi risultati, quindi sono comparabili a quelli ottenuti dal lavoro di [Loser et al, 2010].

Dopo aver visto quindi il materiale presente in letteratura si è proceduto alla messa in opera delle prove e alla loro realizzazione.

Le modalità, le procedure utilizzate e soprattutto i risultati ottenuti saranno sono esposti nella parte successiva della trattazione.

2.2 Parte sperimentale

È la parte in cui si esporranno i risultati delle prove realizzate per l'investigazione del comportamento del materiale in questione. Nello specifico si sono analizzati i comportamenti di ritiro termico ed endogeno al fine di poter calcolare il coefficiente di dilatazione termica del materiale stesso.

Prima di poter realizzare ciò, però, si sono svolte delle prove per poter avere l'assoluta padronanza del comportamento dei macchinari stessi.

Si sono effettuate quindi prove inerenti alla caratterizzazione termica degli strumenti di misura, all'influenza della temperatura ambiente e dell'acqua sulle misure registrate, per poi poter apportare adeguate correzioni termiche.

Per quanto riguarda il calcestruzzo, invece, sono state svolte prove per documentare l'inerzia termica del provino ed i gradienti di temperatura presenti durante le prove stesse. Questa fase è stata inoltre accompagnata da una simulazione termica del comportamento del materiale stesso.

Come precedentemente accennato, per poter calcolare con buona precisione il CDT è necessario avere l'equilibrio termico del provino, e quindi che la temperatura sia omogenea. Ciò comporta avere dei gradienti nulli all'interno del calcestruzzo stesso, nello specifico tra cuore e pelle. Un gradiente, in seguito all'applicazione di una sollecitazione termica infatti potrebbe essere la causa dell'osservazione di una deformazione differita [Sellevold et al. 2006].

La temperatura della pelle sarà considerata pari a quella dell'acqua imposta dal bagno di circolazione, visto che lo spessore del cilindro in acciaio è tale da permettere una trasmissione pressoché istantanea del calore dell'acqua alla parte esterna del calcestruzzo stesso.

Nelle prove successive si imporranno delle variazioni di temperatura (caratterizzazione termica) e si registreranno le variazioni dimensionali che si avranno come conseguenza.

In un calcestruzzo giovane, però le deformazioni di tipo termico sono sovrapposte a deformazioni dovute ad altri fenomeni, come ritiro, gonfiamento, essudazione ecc.

È quindi conveniente separare le deformazioni termiche dal resto; considerate le condizioni in cui si trova il provino (sigillato dall'ambiente esterno), l'unica deformazione, oltre a quella termica, che entra in gioco è quella dovuta al ritiro endogeno, visto che gli altri tipi di ritiro non trovano le condizioni per potersi attivare.

Come si vedrà in seguito comunque, gli effetti del ritiro endogeno sono molto piccoli per il calcestruzzo considerato, visto il rapporto a/c discretamente elevato.

La separazione quindi di questi due tipi di deformazione è possibile applicando una sollecitazione termica periodica, che in questo caso caratterizzerà le modalità di variazione dell'acqua, così da essere facilmente eliminabile in seguito, con un integrale delle deformazioni totali sul periodo della sollecitazione.

Ci si è domandati quale fosse dunque la funzione periodica migliore per raggiungere questo obiettivo; se si fosse infatti applicato un segnale per la variazione dell'acqua a quadrati (come si vedrà nella prova MC003) l'equilibrio termico del provino si sarebbe spezzato istantaneamente a ogni variazione di temperatura, e sarebbe stato necessario attendere l'omogeneizzazione e quindi il nuovo equilibrio, per fare delle misure. Lo stesso problema si sarebbe presentato ad ogni variazione della pendenza, utilizzando una variazione triangolare del periodo.

Con una funzione sinusoidale invece, si sono riusciti ad ottenere degli scarti non troppo importanti tra temperatura di pelle e al cuore del provino, ad ogni variazione di temperatura. Ciò è tanto più vero quanto il periodo della sinusoide è elevato rispetto all'inerzia termica del campione stesso.

A questo punto è stato necessario sapere se è possibile trovare un periodo ed un'ampiezza della sinusoide, caratterizzante la variazione dell'acqua, tali da minimizzare i gradienti nel provino stesso. A tal scopo si è utilizzato un approccio che combina le prove sperimentali fatte inizialmente e il calcolo numerico.

Quest'ultimo è un calcolo incrementale che permette di conoscere la temperatura al passo $n+1$ conoscendo la temperatura al passo n . In seguito, sotto il paragrafo Simulazione Numerica, si entrerà nel dettaglio del calcolo incrementale utilizzato.

La simulazione numerica necessita comunque di un dato, detto tempo di risposta τ , che è stato ottenuto sperimentalmente dalle prove effettuate precedentemente alla simulazione numerica, come nel seguito verrà illustrato.

Verranno ora illustrate dapprima le prove relative alla caratterizzazione termica della strumentazione (correzioni termiche necessarie) e poi quelle sul calcestruzzo (CDT). L'ordine cronologico delle prove non sarà rispettato, al fine di poter raggruppare per argomenti le prove effettuate e quindi facilitare la comprensione del lettore.

L'ordine di esecuzione delle prove può essere comunque ritracciato tramite il nome delle prove stesse, numerate da MC002 a MC013, temporalmente.

Prima comunque di vedere esattamente le assunzioni e gli scopi che si desiderano perseguire dallo studio termico del calcestruzzo, si riporta la descrizione dei macchinari utilizzati per la caratterizzazione del materiale stesso.

Ciò che ci si propone di fare nelle prove per la caratterizzazione termica del materiale, è determinare essenzialmente il coefficiente di dilatazione termica (CDT) di un calcestruzzo ordinario giovane.

2.2.1 Strumenti utilizzati

BTJASPE:

È un macchinario che si trova presso IFSTTAR (prima LCPC) a Parigi ed il cui nome sta per BèTon Jeune Age: Suivi de la Prise et du module Elasticité, il che implica che il macchinario è stato realizzato per il monitoraggio della presa e del modulo di elasticità in calcestruzzi giovani.

Questo macchinario è stato precedentemente utilizzato per il monitoraggio della rigidità del calcestruzzo stesso che sarà utilizzato in questo studio [Boulay et al, 2010].

BTJASPE sarà utilizzato nel corso dello stage per ottenere delle indicazioni sulla ripetibilità dei risultati già ottenuti nelle prove precedenti (monitoraggio meccanico della presa) e per esplorare altre possibilità, quali misure di CDT, fluage e rilassamento.

Il macchinario è composto da un cilindro centrale in acciaio inox di 100 mm di diametro interno e 102mm di diametro esterno, e altezza 254mm, (Figura 1.11).

All'interno del cilindro sarà inserita una termocoppia per la misura della temperatura al cuore del calcestruzzo stesso, che fresco, verrà colato nel macchinario per un'altezza di 205mm .

Il cilindro in acciaio sopra citato forma un'intercapedine con una parete esterna in vetro (Figura 1.2), nella quale verrà fatta circolare dell'acqua, tramite un bagno di circolazione, che permetterà di poter controllare e regolare la temperatura del cilindro in acciaio.

Nell'intercapedine, quindi, attraverso due rubinetti, collegati ad un bagno di circolazione, nel cui dettaglio si entrerà in seguito, verrà fatta circolare dell'acqua fino al completo riempimento del cilindro, introdotta dal basso verso l'alto per evitare la formazione di bolle d'aria.

Tre colonne in acciaio esterne al cilindro hanno il compito di fungere da base d'appoggio dei tre captori di spostamento, elementi attraverso il quali verrà monitorato l'abbassamento, e quindi la riduzione di volume, del calcestruzzo stesso (Figura 1.12).

I captori saranno descritti più approfonditamente in seguito, in quanto la loro sensibilità e precisione è stata adeguatamente indagata per dare una garanzia di correttezza e giusta interpretazione dei risultati finali.

La parte superiore del macchinario (Figura 1.13) è costituita da un pistone in acciaio, di peso 1,92kg, che permette di sottoporre a carico il calcestruzzo all'interno del cilindro. Quest'ultimo, per permettere un carico correttamente effettuato, dovrà essere perfettamente livellato, quando gettato, in modo tale da garantire un buon contatto con la faccia del pistone stesso. Il diametro di questa parte è appena inferiore al diametro interno del cilindro in acciaio. Il pistone è dotato di fori al fine di permettere l'affiorare dell'acqua di essudazione.

Uno strato di grasso, il cui spessore è stimato tra 50 e 100 μm sarà messo su tutta l'altezza del cilindro e all'interno dei fori del pistone, per evitare sia i problemi dovuti all'estrazioni del provino maturo, sia l'otturazione dei fori stessi per la risalita di cemento e parte fina, oltre a permettere di realizzare la prova in condizioni non confinate.

Il pistone è dotato di tre "bracci" che permettono il posizionamento dei tre captori di spostamento in corrispondenza delle colonne.

La parte inferiore è costituita da una base in acciaio, sigillata da una guaina in gomma, forata al centro e attraverso la quale verrà inserita la termocoppia. La termocoppia inserita avrà una lunghezza pari a metà dell'altezza circa, del cilindro in acciaio.

Appena al di sotto della base si trova un'altra intercapedine, come quella superiore, dotata di rubinetti e fissata all'estremità del martinetto della pressa. Questa permette anch'essa la circolazione dell'acqua, al fine del raffreddamento della parte centrale inferiore. Si può così contare su una temperatura costante, che sarà controllata attraverso una sonda di platino, tra la base e la parte inferiore. Per la parte inferiore della pressa, e quindi per riempire l'intercapedine d'acqua, è necessario un secondo bagno di circolazione.

Il martinetto della pressa rappresenta quindi la parte inferiore del macchinario. È alimentato con olio idraulico messo in pressione attraverso una pompa situata nel sottosuolo dell'edificio. La temperatura di funzionamento è dell'ordine di 50°C, il che comporta la presenza di un sistema di evacuazione del calore. Senza questo sistema, infatti, il provino, se non raffreddato come spiegato in precedenza, può arrivare a presentare una temperatura di 30°C in qualche ora (Figura 1.14).

La parte superiore a BTJASPE (Figura 1.15) è dotata di un piccolo pistone in acciaio, collegato ad una molla e il cui spostamento è rilevato da un captore di spostamento.

Questo dispositivo permette di far entrare in contatto il cono superiore di carico con la parte superiore di BTJASPE. La mancanza di “delicatezza” della pressa, infatti, per l'imposizione del carico sul provino, ha fatto sì che fosse progettato questo cono con il pistoncino in acciaio, per un'imposizione graduale del carico. Qualora l'imposizione non fosse graduale, infatti, si avrebbero dei problemi soprattutto sul calcestruzzo ancora fresco.

Questo insieme di apparecchi entra in gioco quando ci si trova a fare la caratterizzazione meccanica con una pressa, come anticipato precedentemente.



Figura 1.11

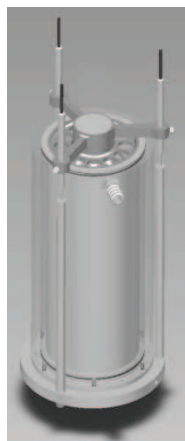


Figura 1.12



Figura 1.13

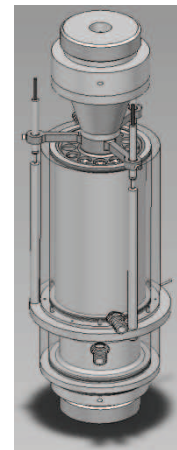


Figura 1.14

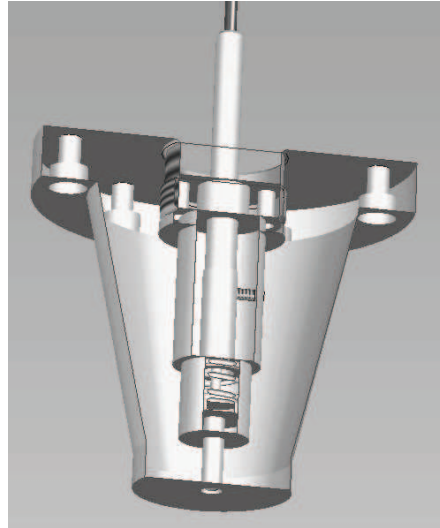


Figura 1.15

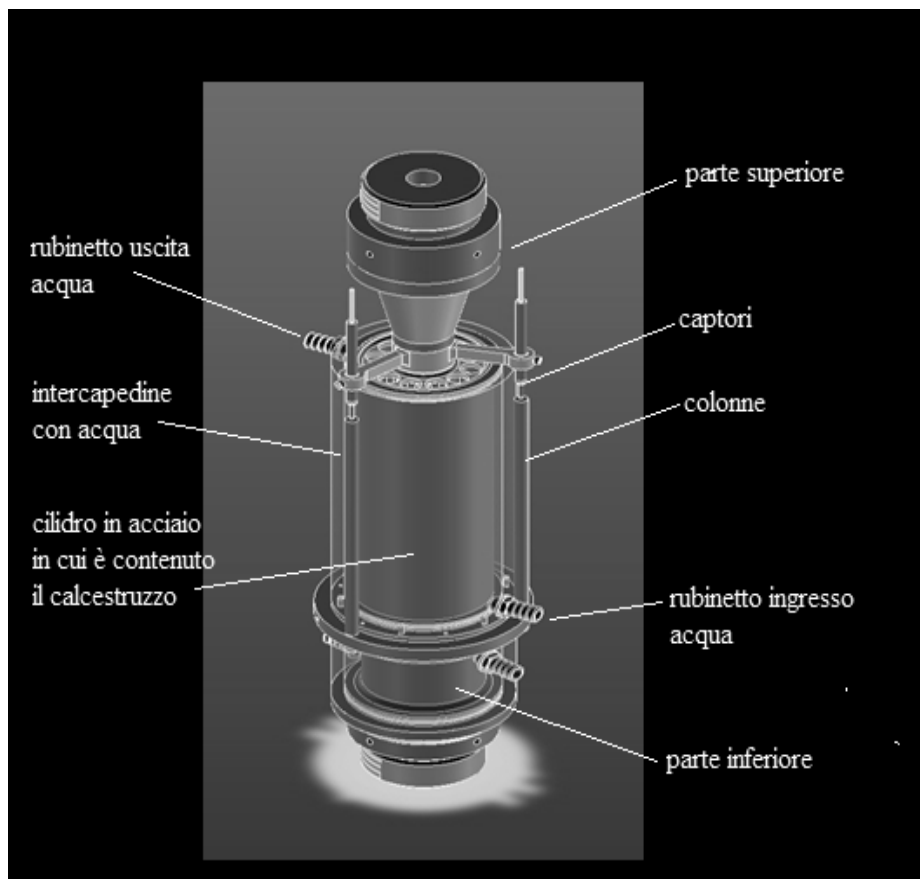


Figura 1.16

Nel corso delle prove, saranno quindi imposte delle variazioni di temperatura. Le misure inerenti la temperatura, saranno quindi rilevate tramite termocoppie o delle sonde di platino, dette PT100.

Le misure di spostamento, invece, con 3 captori di spostamento lineare (LVDT-Linear Variable Displacement Transducer).

Sonda di platino o PT100:

Il suo funzionamento si basa sul fatto che la resistenza elettrica del platino varia con la temperatura. Inoltre è possibile conoscere con grande precisione le proprietà elettriche del platino con cui si lavora, ciò implica che più il platino è puro e più la misura effettuata dallo strumento sarà precisa.

Quella che comunemente viene chiamata PT100 ha una resistenza di 100Ω a 0°C e di $138,5\Omega$ a 100°C .

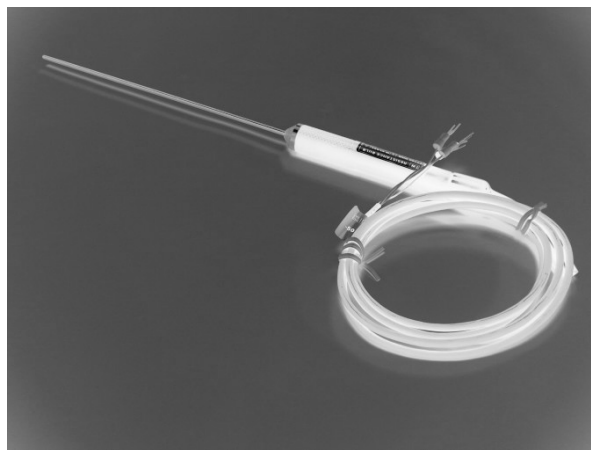


Figura 1.17

Termocoppia:

È un apparecchio per la misura della temperatura, che nel nostro caso è utilizzato per il rilevamento di quella al cuore del calcestruzzo. In linea generale il funzionamento della termocoppia può essere spiegato come segue: si ha innanzitutto una coppia di conduttori elettrici, di diverso materiale, che da una parte verrà unita (giunto caldo). L'altra verrà connessa ad un condizionatore di termocoppie (giunto freddo).

Nel giunto caldo verrà applicata la temperatura da misurare, mentre nel giunto freddo verrà a crearsi, poiché le cime dei due conduttori sono separate, una differenza di potenziale elettrico tra le due estremità. Questa differenza di potenziale elettrico è funzione della differenza di temperatura tra le giunzioni.

La temperatura della giunzione a freddo è nota (ad esempio può essere fissata a 0°C).

La misura che si andrà ad effettuare è quindi un rilevamento della differenza di temperatura (giunto caldo- giunto freddo) che si riconduce ad una differenza di potenziale. La relazione tra differenza di temperatura e differenza di potenziale non è perfettamente lineare. Esistono delle tavole che forniscono questa corrispondenza, ma i condizionatori di termocoppie oggi sul mercato, tengono già conto di questa non linearità, cosicché il segnale in uscita sia proporzionale alla temperatura misurata.

È quindi necessario, come vedremo in seguito nell'analisi dei risultati delle prove, conoscere la risposta della termocoppia utilizzata in funzione della temperatura, al fine di trovare una corrispondenza tra la differenza di potenziale e la differenza di temperatura.

Questo tipo di strumento di misura della temperatura ha principalmente il vantaggio che, oltre ad essere poco costoso, è capace di effettuare delle misure su una grande gamma di valori di temperatura.

L'unico difetto, però, è la precisione: è difficile ottenere degli errori di misura al di sotto di 0,5°C.

Per la caratterizzazione della sensibilità della termocoppia interna al provino di calcestruzzo, si è appositamente realizzata una prova riportata con il nome di MC009.

Captori di spostamento (LVDT):

I captori utilizzati per il rilevamento degli spostamenti sono quattro.

Gli strumenti in questione utilizzati in questo studio permettono una corsa massima di 5mm, 2,5 in trazione e 2,5 in compressione e sono stati calibrati in modo da ottenere una tensione di +10V in corrispondenza di uno spostamento di trazione di +2,5mm e -10V per uno spostamento in compressione di -2,5 mm.



Figura 1.18

Per quanto riguarda il procedimento di taratura dei captori sarà analizzata in seguito.

Bagno termostatico o di circolazione:

Il bagno di circolazione o bagno termostatico, è il macchinario utilizzato con la funzione di far circolare l'acqua nell'apposita intercapedine di BTJASPE è LAUDA R K8 KP, di cui sotto è riportata un'immagine (Figura 1.10) .



Figura 1.19

Questo macchinario ha una capienza di 10 litri di acqua e consente di regolare e programmare delle variazioni di temperatura del fluido stesso.

Nel corso delle prove svolte, dapprima, come si vedrà in seguito, si è scelto di mantenere la temperatura dell'acqua costante, ma successivamente si sono imposte delle variazioni cicliche.

L'apparecchio è stato quindi utilizzato in questo studio per imporre una variazione tramite "segmenti" alla temperatura dell'acqua circolante in BTJASPE. Il macchinario permette una programmazione di un massimo di 99 segmenti. Per delle spiegazioni più specifiche si rimanda alla descrizione più dettagliata fornita nella parte inerente a ciascuna prova.

Si ricorda inoltre che un altro bagno di circolazione è stato utilizzato per far circolare l'acqua nella parte inferiore della pressa, nelle prove di caratterizzazione meccanica.

PICO PT104:

È un apparecchio a quattro canali che permette di misurare delle temperature con una risoluzione di $0,001^{\circ}\text{C}$ e una precisione di 0.01°C , se usato con dei sensori PT100. Questo è in grado di misurare anche tensioni (0-2,5V) e resistenze.

Con il macchinario è fornito, dalla ditta produttrice, un software programmabile, in cui le misurazioni vengono automaticamente registrate e diagrammate.



Figura 1.20

Condizionatore CA31 Solartron:

è lo strumento che permette di avere in entrata sia gli spostamenti dei 3 captori che il captore di contatto. In uscita, il condizionatore fornisce un segnale proporzionale alla media dei tre captori, e quindi permette l'utilizzo, durante le prove, di un solo canale per il rilevamento dello spostamento.

Condizionatore di termocoppie:

è un macchinario a 10 canali, che permette di collegare la termocoppia inserita all'interno di BTJASPE. L'uscita è connessa a PICO PT 104.

Schematicamente quindi, il collegamento tra i vari macchinari si può rappresentare come segue:

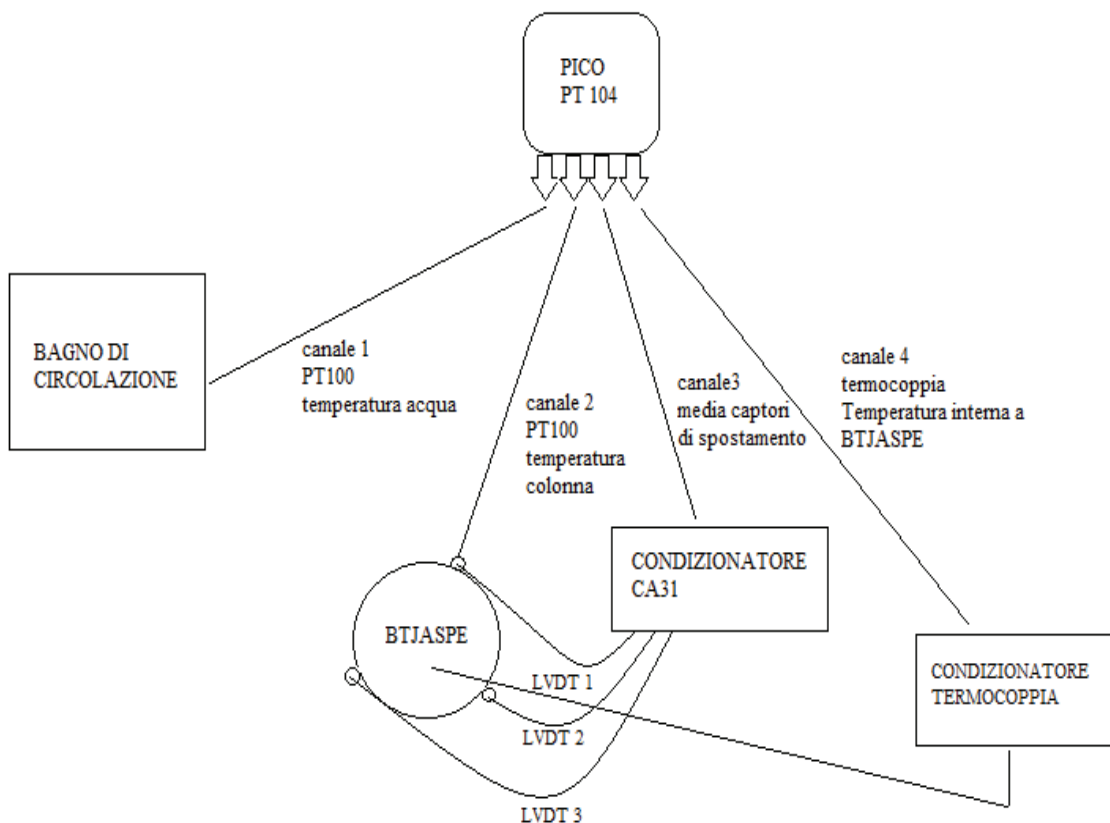


Figura 1.21

2.2.2.1 Sensibilità degli strumenti di misura

2.2.2.1.1 Taratura dei captori di spostamento (LVDT)

Prima dell'utilizzo di questi apparecchi si è proceduto alla loro taratura. La taratura consiste nel caratterizzare la corrispondenza tra le letture effettuate con lo strumento di taratura e uno spostamento con una scala di riferimento imposta al captore stesso. Questa caratterizzazione permette di quantificare la sensibilità, lo scarto, la ripetibilità e l'isteresi del captore e del suo condizionatore.

Il procedimento per la calibrazione dei captori è stato effettuato seguendo le prescrizioni riportate in normativa NF E 11068- annesso B1, e la cui procedura è stata riportata in un documento facente parte dei certificati di qualità presso LCPC [Boulay,2002].

Il macchinario nel quale si inserisce il captore che sarà sottoposto a taratura, è un banco di prova detto BSH, dal nome dei costruttori (Brown et Sharp, Heidenhain), che è stato tarato esso stesso in accordo con i campioni nazionali che si trovano presso LNE (Laboratoire National de métrologie et d'Essais) di Parigi .

Questo macchinario, di cui in seguito si è riportata un'immagine (Figura 1.9) , è dotato di una base in marmo e di una colonna a cui è collegato il captore MT25 (Heidenhain). Sono presenti due viti superiori per la regolazione dello scorrimento del captore LVDT da "calibrare", una a più alta precisione rispetto all'altra. Sono richieste delle viti con precisione micrometrica per permettere il posizionamento del captore a circa 0,1mm. Si ricorda, infatti, che la corsa prevista dai captori utilizzati è piccola, di 2,5 in trazione e 2,5 in compressione.



Figura 1.22

Oltre al banco BSH e ai tre captori sono stati utilizzati altri due macchinari, l'uno collegato al captore LVDT, detto in seguito condizionatore del captore, l'altro collegato al captore MT25, detto in seguito condizionatore della referenza.

Si è quindi seguita la seguente procedura per la calibrazione dei captori:

- 1- Il primo captore è stato montato sul banco BSH.
- 2- Il captore, dovrà essere posizionato in modo tale che il condizionatore del captore segni lo 0. Una volta che il captore è in una posizione abbastanza prossima allo 0, si procede a bloccarlo attraverso il serraggio della prima vite. Con il serraggio della seconda, a più alta precisione, si riesce ad avere un valore molto vicino a 0.
- 3- Si procede a regolare sullo 0 anche condizionatore di referenza.
- 4- Ora si può quindi iniziare la lettura dei valori, dove, sul condizionatore di referenza si andrà a leggere lo spostamento in mm e nel condizionatore del

captore il relativo valore in Volt, che si ricorda dovrà essere circa +10V per uno spostamento di +2,5mm e -10 V per uno spostamento di -2,5mm.

- 5- Si posiziona il captore, attraverso la regolazione della vite in posizione di estensione massima, in modo da superare di poco lo scorrimento massimo positivo del captore, nel nostro caso +2,5mm
- 6- Ci si porta quindi a +2,5 mm e si legge la tensione di uscita in Volt del condizionatore di LVDT corrispondente.

Sono state quindi effettuate delle letture per i seguenti spostamenti, 11 come in accordo con normativa:

+2,5; +2,0; +1,5; +1,0; +0,5; 0,0; -0,5; -1,0; -1,5; -2,0; -2,5;

Una volta quindi lette le misure in Volt corrispondenti a ciascuna delle precedenti misure di spostamento, si è stata nuovamente ripetuta la stessa procedura ma con ordine inverso degli spostamenti, per caratterizzare l'isteresi di ciascun captore.

Superato quindi il valore -2,5 mm, si sono lette le misure dei volt per i seguenti spostamenti:

-2,5; -2,0; -1,5; -1,0; -0,5; 0,0; +0,5; +1,0; +1,5; +2,0; +2,5

Ovviamente per quanto precisa possa essere la mano dell'operatore difficilmente si riesce ad ottenere lo spostamento preciso, come ad esempio 2,5000 mm; si è comunque cercato di avere la più alta precisione possibile.

7-una volta quindi ottenute due misure per spostamento, si è proceduto alla registrazione dei volt corrispondenti a 10%,50% e 90% della corsa (spostamenti pari a +2;0;-2 mm) per verificare la ripetibilità dei dati del captore.

Ci si è quindi posizionati a +2mm successivamente a 0 e poi ancora a -2 per tre volte.

Tutta la procedura sopra descritta è stata seguita tre volte, una per ciascun captore.

Sono stati dunque ottenuti i seguenti risultati:

Per il primo captore:

mm	isteresi (V)		ripetibilità (V)		
2,5	10,0236	10,0267			
2	8,0275	8,029	8,0285	8,0295	8,0294
1,5	6,0209	6,0211			
1	4,0118	4,0126			
0,5	2,0068	2,0077			
0	0,0013	0,0026	0,002	0,002	0,0022
-0,5	-2,0048	-2,0033			
-1	-4,0134	-4,0119			
-1,5	-6,0281	-6,0261			
-2	-8,0439	-8,0399	-8,0411	-8,0408	-8,0401
-2,5	-10,0438	-10,048			

Tabella 1.2

Grazie alle misure effettuate, si caratterizzano la curva di taratura, gli scarti di precisione, l'isteresi e la ripetibilità.

E inoltre per i valori riportati in tabella, è stata calcolata la deviazione standard con la propria media e l'indicatore di sensibilità all'isteresi.

È stato inoltre ricavato un grafico, sotto riportato, che rappresenta la retta di taratura e mette in correlazione gli spostamenti e la misurazione per l'isteresi in Volt.

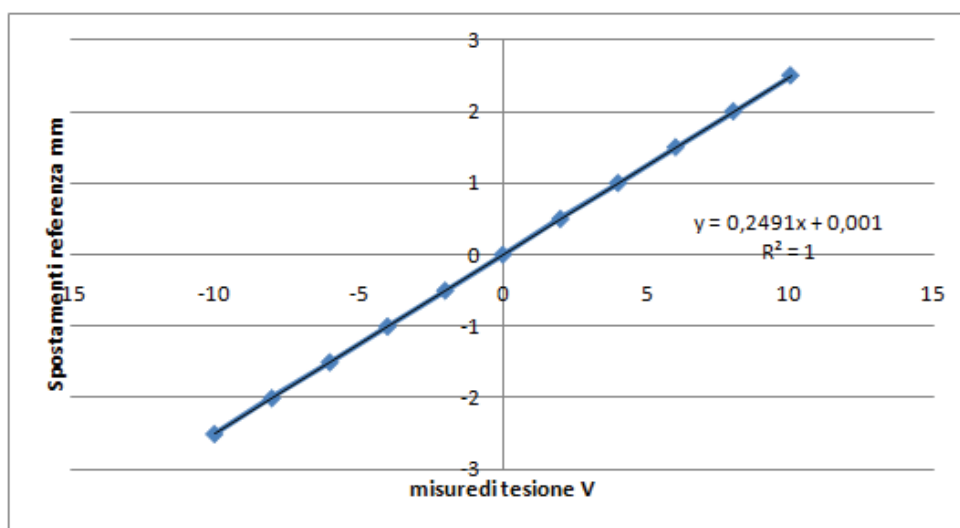


Figura 1.23

Dall'equazione della retta si è quindi ricavata la sensibilità del primo captore, pari a 0,2491 mm/V.

Per il secondo captore quindi:

mm	isteresi (V)		ripetibilità (V)		
2,5	10,0254	10,0286			
2	8,0268	8,0316	8,0282	8,0287	8,0286
1,5	6,0184	6,0194			
1	4,0089	4,009			
0,5	2,0043	2,0074			
0	0,0005	0,0033	0,0009	0,0021	0,0008
-0,5	-2,0015	-1,9978			
-1	-3,9985	-3,9826			
-1,5	-5,9999	-5,9929			
-2	-7,9974	-7,9924	-7,997	-7,9945	-7,9933
-2,5	-10,0099	-10,0099			

Tabella 1.3

Grazie alle misure effettuate, si caratterizzano la curva di taratura, gli scarti di precisione, l'isteresi e la ripetibilità.

E inoltre per i valori riportati in tabella, è stata calcolata la deviazione standard con la propria media e l'indicatore di sensibilità all'isteresi.

È stato inoltre ricavato un grafico, sotto riportato, che rappresenta la retta di taratura e mette in correlazione gli spostamenti e la misurazione per l'isteresi in Volt.

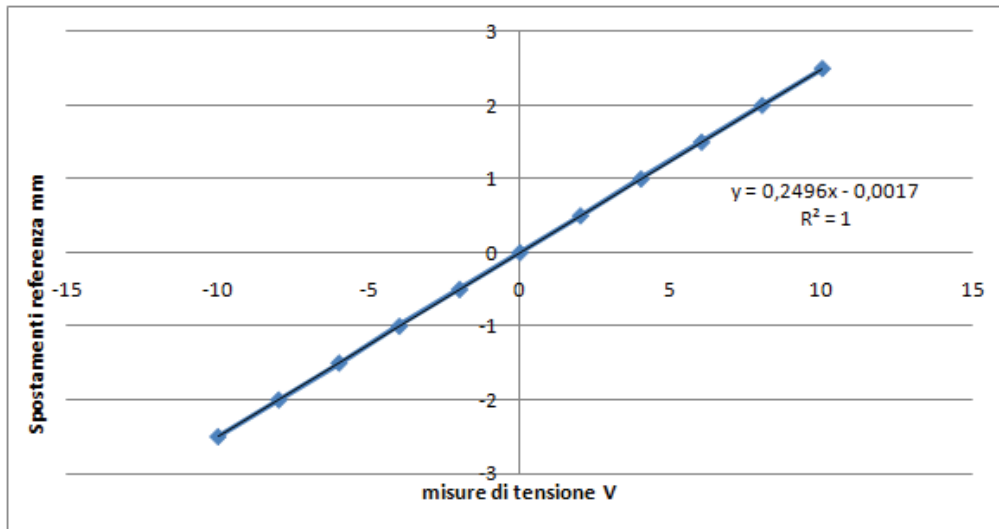


Figura 1.24

Come si può vedere dal coefficiente angolare della retta ottenuta per il secondo captore, la sensibilità di quest'ultimo è circa uguale alla sensibilità del primo captore, pari a 0,2496 mm/V.

Per il terzo captore, infine:

mm	isteresi (V)		ripetibilità (V)		
2,5	10,0014	10,0026			
2	8,0089	8,0102	8,0096	8,0097	8,0103
1,5	6,007	6,0117			
1	3,9989	4,0035			
0,5	2,0032	2,0082			
0	0,0064	0,0057	0,0058	0,0057	0,0054
-0,5	-1,995	-1,9945			
-1	-3,993	-3,9913			
-1,5	-6,0017	-5,9999			
-2	-8,0103	-8,0093	-8,0086	-8,009	-8,0106
-2,5	-10,00296	-10,012			

Tabella 1.4

Grazie alle misure effettuate, si caratterizzano la curva di taratura, gli scarti di precisione, l'isteresi e la ripetibilità.

E inoltre per i valori riportati in tabella, è stata calcolata la deviazione standard con la propria media e l'indicatore di sensibilità all'isteresi.

È stato inoltre ricavato un grafico, sotto riportato, che rappresenta la retta di taratura e mette in correlazione gli spostamenti e la misurazione per l'isteresi in Volt.

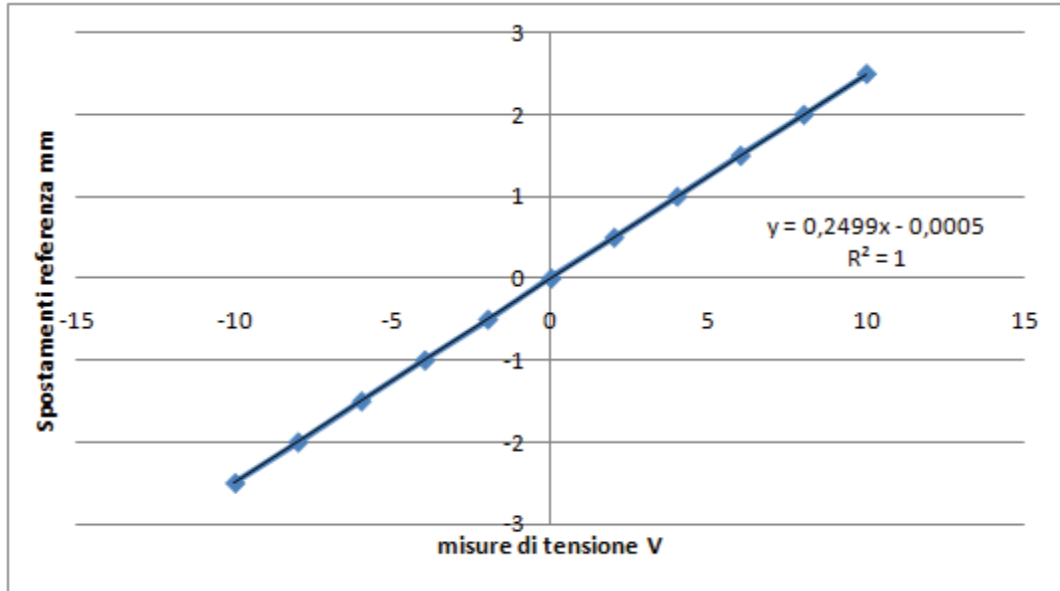


Figura 1.25

Come si vede anche qui la sensibilità del terzo captore è risultata in linea con le altre e pari a 0,2499 mm/V.

La sensibilità allo spostamento degli LVDT servirà quindi per convertire le tensioni rilevate (Volt) in mm, come verrà poi spiegato nelle singole prove

2.2.2.1.2 Sensibilità della termocoppia MC009

PROVA MC009

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 03/11/2010
- Inizio delle misure: 17:25:00
- Condizioni di prova: Temperatura acqua 16°C-24°C; Temperatura ambiente costante
- Scopo della prova: determinare la sensibilità della termocoppia all'interno del provino di calcestruzzo; determinare la risposta a una variazione di temperatura (utile per la simulazione termica)

Questa prova è stata effettuata al fine di caratterizzare la sensibilità della termocoppia situata all'interno del provino di calcestruzzo, situato nel cilindro in acciaio che costituisce BTJASPE.

Inizialmente la sensibilità della termocoppia era stata stimata di 25°C/V, ma come vedremo grazie a questa prova si è potuto affinare questo valore per quindi applicarlo a tutte le prove precedenti e successive.

La prova è stata effettuata sullo stesso provino di calcestruzzo ordinario utilizzato nella prova MC006, che ormai ha raggiunto 8 giorni di vita.

Per la realizzazione della prova sono stati dunque creati 2 “gradini” di temperatura dell'acqua, al fine di poter fare delle registrazioni a regime permanente: il primo a 16°C e il secondo a 24°C. La temperatura ambiente della sala di prova è stata mantenuta costante a 20°C.

In seguito si riporta la tabella in cui sono riassunte le osservazioni effettuate:

gradino	Inizio(mn)	Fine(mn)	Tacqua(°C)	Tensione termocoppia(V)
16°C	30	490	15,86	0,647
24°C	520	680	23,85	0,962

Tabella 9.1

Nella prima colonna, come si vede, si sono riportate le temperature dei due gradini creati per avere delle misurazioni a regime permanente.

Il primo tratto costante quindi è quello dei 16°C che è stato mantenuto per circa 460 minuti, ed ha fornito una temperatura media dell'acqua di 15,85°C e una tensione media registrata dalla termocoppia di 0,647V.

Per il secondo tratto costante, quello di 24°C, mantenuto per 160 minuti, si è registrata una temperatura media dell'acqua di 23,85°C e una tensione media della termocoppia di 0,962V.

Con i valori ottenuti dalla tabella è stato quindi possibile calcolare la sensibilità della termocoppia secondo la seguente espressione

$$T_{thmcp1}(^{\circ}C) = T_{thmplt}(V) \times a + b$$

in cui

$$a = \frac{23,85 - 15,86}{0,962 - 0,647} = 25,42^{\circ}C/V$$

$$b = 15,85 - 25,42 \times 0,647 = -0,595^{\circ}C$$

2.2.2.2 Influenza della temperatura sulle misure effettuate

Questa caratterizzazione è fatta mettendo al posto del provino di calcestruzzo, un parallelepipedo in silice, caratterizzato dall'aver un coefficiente di dilatazione termica molto prossimo allo zero. Si indaga qui sull'influenza delle variazioni della temperatura ambiente a temperatura d'acqua costante e viceversa sulle misure effettuate.

2.2.2.2.1 Influenza della temperatura ambiente MC002-MC005

PROVA MC002 (una sola colonna isolata)

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 21/10/2010
- Inizio delle misure: 14:08:00 (Durata: 1138 minuti)
- Condizioni di prova: Parallelepipedo in silice di 205 mm in BTJASPE; Temperatura acqua costante a 20°C; Temperatura ambiente variabile tra 24°C e 16°C; 1 colonna isolata
- Scopo della prova: determinare la sensibilità dello spostamento a una variazione di Temperatura ambiente

Lo scopo di questa prova è quindi quello di quantificare la parte di spostamento dovuto a delle cause termiche, che va a riguardare le differenti parti del dispositivo sperimentale (colonne, base e pistone superiore), quando la temperatura dell'acqua che circonda BTJASPE è costante e le sole variazioni che si hanno sono quelle della temperatura ambiente della sala.

All'interno di BTJASPE è stato introdotto un parallelepipedo di lunghezza 205mm, in silice, caratterizzato da un coefficiente di dilatazione termica nullo, così da permettere un monitoraggio e una registrazione precisa delle dilatazioni riguardanti solo il materiale del macchinario.

Apparecchiatura utilizzata:

- PT100: nel bagno di circolazione, al fine di verificare se effettivamente la temperatura rilevata nel bagno di circolazione dalla sonda di platino fosse costante a 20°C.

- PT100: su una delle 3 colonne, adeguatamente isolata dall'esterno
- termocoppia: all'interno di BTJASPE, con lo scopo di misurare la temperatura interna al cilindro in acciaio e vedere come è influenzata da temperatura dell'acqua e dalla temperatura ambiente.
- 3 captori di spostamento (LVDT),per misurare lo spostamento durante tutta la prova. I tre captori sono connessi al condizionatore che effettua direttamente la media degli spostamenti rilevati.

Questi rilevatori di spostamento e temperatura sono stati collegati a PICO PT104, adeguatamente programmato, con un intervallo di registrazione di 2 minuti.

Sono state create quindi 4 vie, una per ogni acquisizione dei dati rilevati.

Per la prova in questione si è utilizzata la sensibilità della termocoppia determinata con la prova MC009. Per lo spostamento dei captori una sensibilità pari a 0,25mm/V, ottenuta dalla taratura dei captori; così facendo i valori espressi in Volt rilevati dalla termocoppia e dai captori, sono stati riportati in °C.

Per la comprensione dei risultati ottenuti, si è ritenuto indispensabile tracciare 4 grafici che saranno in seguito riportati e commentati:

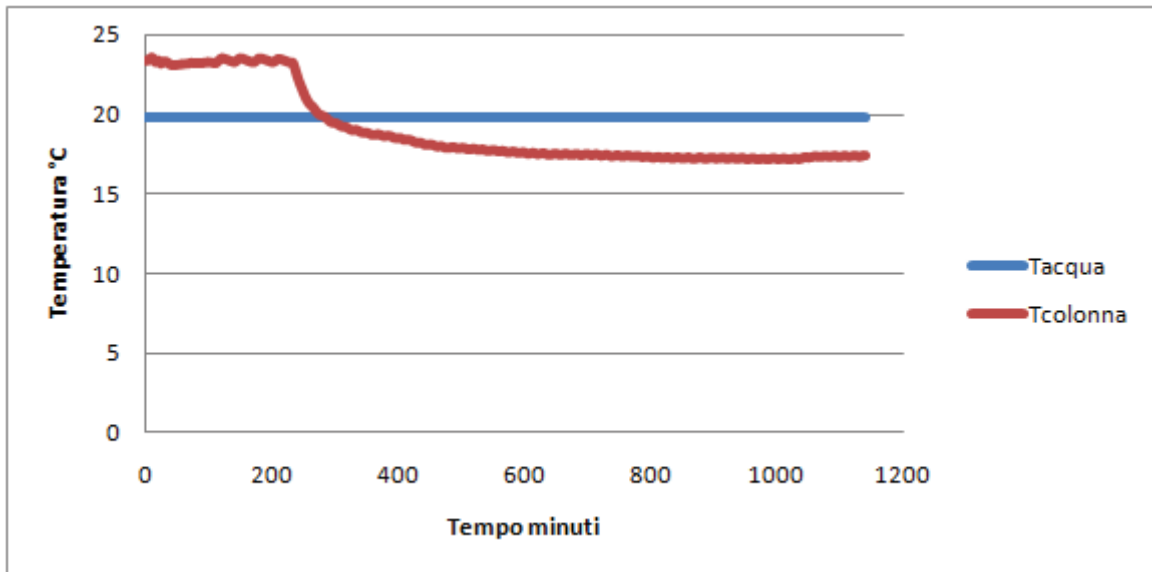


Figura 2.1

Nel grafico riportato in figura 1.1, riporta l'evolvere delle misure di temperatura in funzione del tempo.

Si può vedere come la sonda PT100, posta nel bagno di circolazione, abbia rilevato una temperatura dell'acqua costante e molto prossima ai 20°C, conforme alla consegna data al bagno stesso.

La curva rossa, invece è rappresentativa della temperatura della colonna. Si ricorda che la temperatura ambiente è stata fatta variare da 16°C a 24°C. La temperatura della colonna, quindi ha subito una variazione che segue la temperatura ambiente (23,446°C a 17,4°C). L'isolante che è stato posizionato sulla colonna serve solo ad "attenuare" le fluttuazioni rapide della temperatura ambiente. Dalla forma della curva, che si presenta come definita e non "disturbata", si può dedurre che i dispositivi di misura funzionino precisamente.

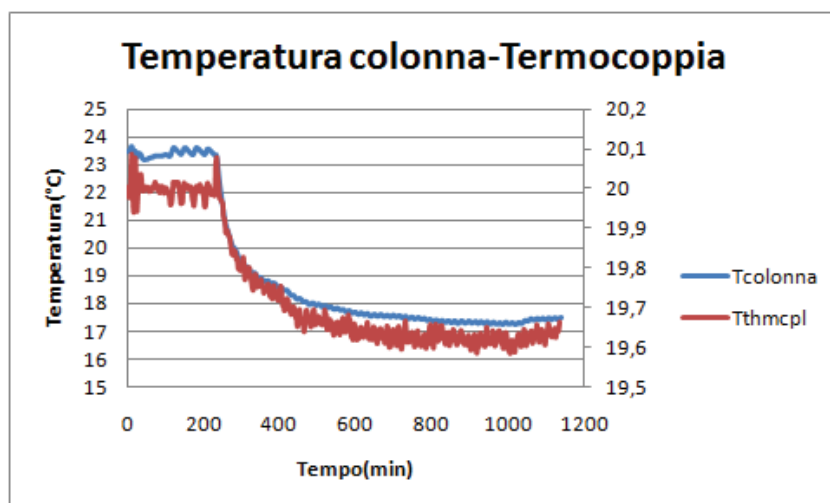


Figura 2.2

In figura 1.2 sono state riportate a confronto le variazioni di temperatura della colonna e della termocoppia situata all'interno di BTJASPE. Nell'asse orizzontale è riportato il tempo, in minuti della prova, e negli assi verticali le temperatura.

Nello specifico nell'asse verticale principale la temperatura della colonna, e in quello secondario la temperatura della termocoppia.

Sebbene le scale siano diverse, l'andamento delle curve è lo stesso. L'ampiezza della variazione di temperatura delle colonne è di 6°C mentre quella termocoppia in BTJASPE è di 0,3°C.

In linea di massima la temperatura della termocoppia, non dovrebbe subire che l'influenza della temperatura dell'acqua, posta intorno a BTJASPE. Il fatto che l'andamento delle curve sia lo stesso indica chiaramente che la temperatura ambiente ha un'influenza sulla misura.

Ciò potrebbe essere spiegato con il fatto che la presa del condizionatore di termocoppie è influenzata dalla temperatura esterna. I cavi della termocoppia, infatti, arrivano al condizionatore con una presa a viti, la cui temperatura è generalmente misurata con una sonda di tipo differente dalla termocoppia. Secondo il tipo di presa e di sonda, questa misura può non essere precisa, cosa che si traduce nell'effetto che si rileva nella prova in questione.

Nelle prossime prove che verranno effettuate, comunque, la temperatura ambiente sarà mantenuta costante, e questo problema sarà eliminato.

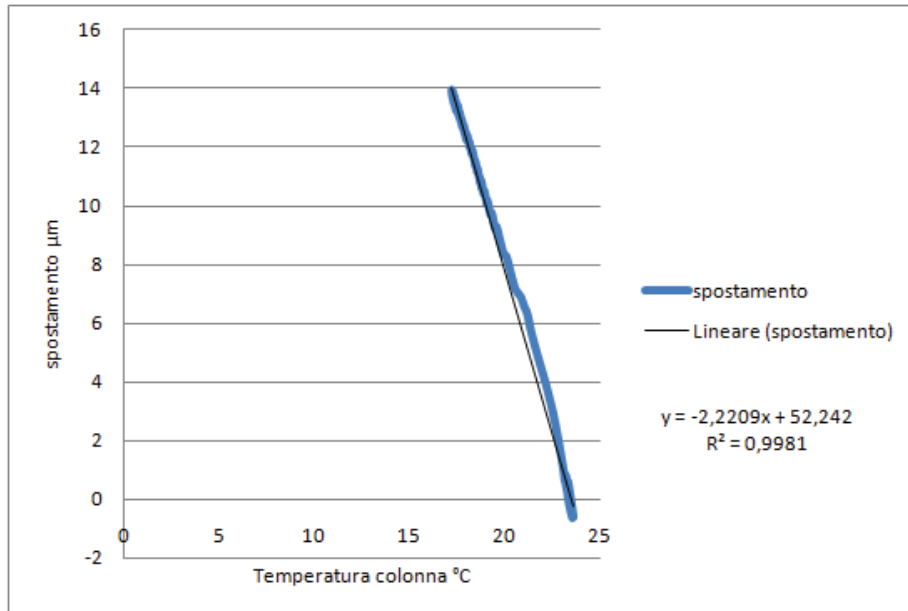


Figura 2.3

Nel grafico 2.3 sono state messe in relazione la temperatura della colonna e lo spostamento medio (media degli spostamenti misurati dai 3 LVDT).

Ciò che risulta è una retta il cui coefficiente angolare rappresenta la sensibilità del dispositivo sperimentale alla temperatura.

La sensibilità del macchinario di misura a delle variazioni di temperatura ambiente è di $-2,2\mu\text{m}/^\circ\text{C}$. Sono principalmente le colonne a deformarsi sotto l'effetto di variazioni di temperatura ambiente. In effetti se si fa un rapido conto, ipotizzando un valore di CDT per l'acciaio inossidabile delle colonne di $10,5\mu\text{def}/^\circ\text{C}$, si trova una sensibilità (moltiplicando la lunghezza delle colonne per il CDT) pari a $2,52\mu\text{m}/^\circ\text{C}$.

Dalla lettura del grafico si ha inoltre che l'aumentare della temperatura della colonna provoca un accorciamento dei tre captori di spostamento, che ha come effetto una diminuzione della tensione in uscita dal condizionatore (è la convenzione scelta per i captori di corsa $\pm 2,5\text{mm}$). Questo spiega il segno del coefficiente di sensibilità termica.

Gli LVDT quando si accorciano, stanno subendo una compressione, e quindi rilevano uno spostamento negativo.

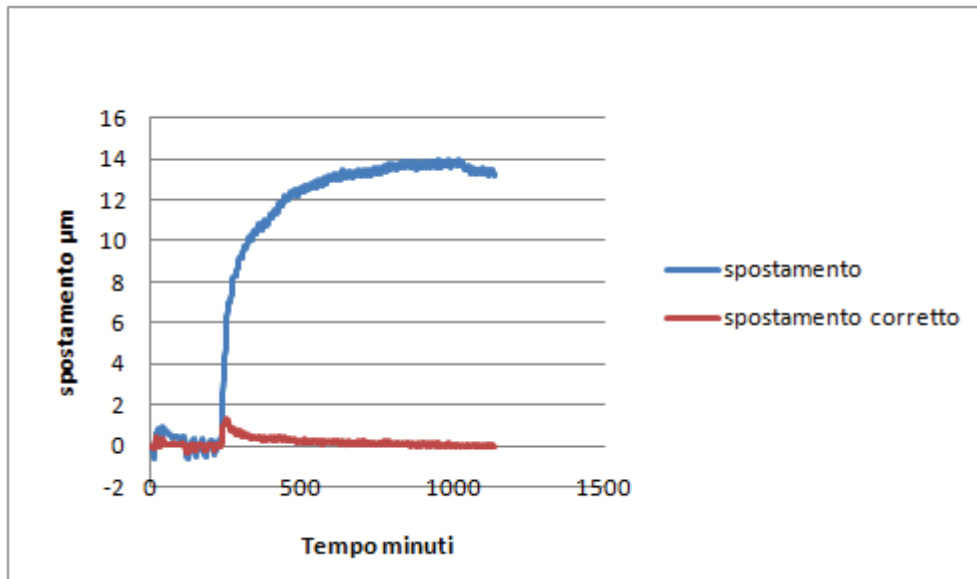


Figura 2.4

Per quanto riguarda quest'ultimo grafico (Figura 2.4) mostra lo spostamento non corretto dagli effetti termici. Se la correzione è buona, la curva che ne risulta deve essere orizzontale. Si osserva una zona di transizione sulla curva corretta, che può essere attribuita a delle temperature diverse delle tre colonne (si ricorda infatti che solo una delle tre colonne è isolata). Nelle prove successive, quindi, si isoleranno tutte e tre le colonne, nello stesso modo, per cercare di diminuire questo effetto. Quanto appena esposto verrà fatto nella prova MC005. Bisogna comunque dire che lo scarto, in rapporto alla risposta orizzontale, è molto piccolo ($1\mu\text{m}$).

Si può vedere la presenza di un gradiente di temperatura nella misurazione fatta dai captori LVDT.

PROVA MC005 (isolamento delle 3 colonne)

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 25/10/2010
- Inizio delle misure: 16:48:14
- Condizioni di prova: Parallelepipedo in silice di 205 mm in BTJASPE; Temperatura acqua costante a 20°C; Temperatura ambiente variabile tra 24°C e 16°C; 3 colonne isolate
- Scopo della prova: verificare se si può migliorare la correzione termica, rispetto alla prova MC002

Le condizioni caratterizzanti questa prova sono le stesse viste nella prova precedente e quindi Temperatura ambiente variabile tra 16°C e 24°C e Temperatura acqua costante a 20°C. La differenza sta nel fatto che le colonne sono state tutte isolate, allo stesso modo, dall'ambiente esterno.

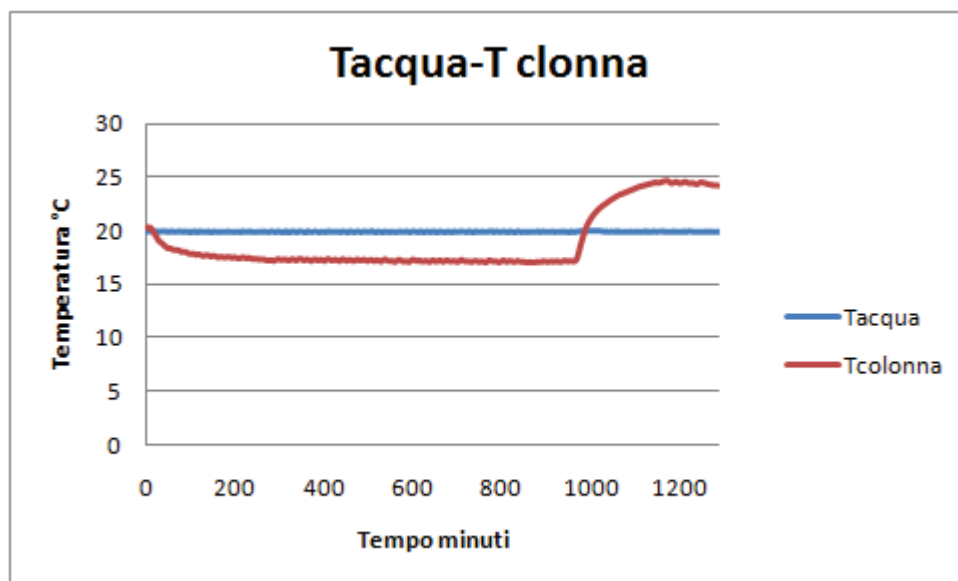


Figura 5.1

Come si può vedere nella figura sopra riportata, la temperatura dell'acqua rimane costante a 20°C per tutta la durata della prova, circa 20 ore. La temperatura della colonna, invece segue la temperatura ambiente, registrando un abbassamento iniziale, e

rimanendo poi circa costante finché si ha la registrazione di un'ascesa in corrispondenza di circa 960 minuti, quando in effetti è stata imposta la temperatura ambiente di 24°C.

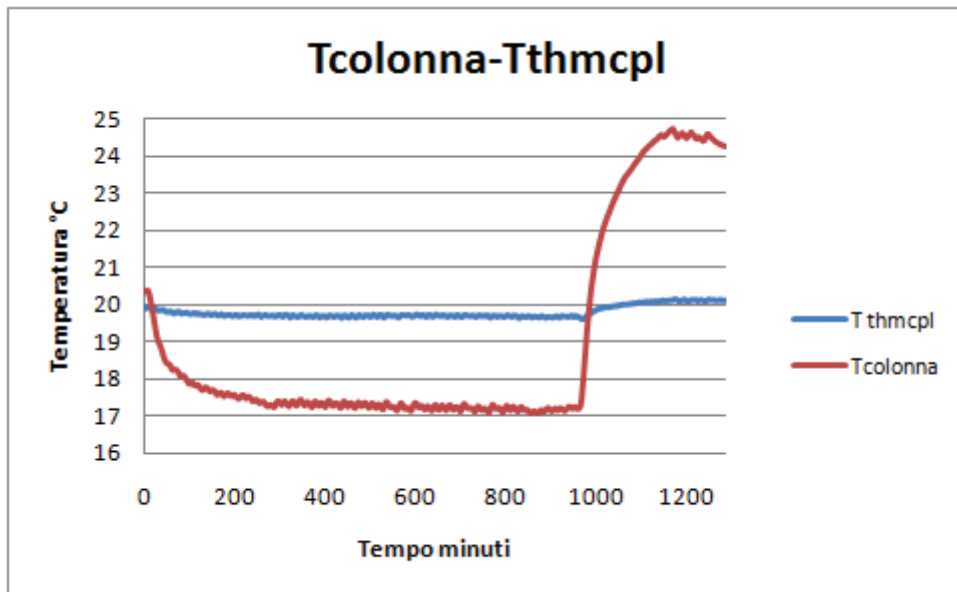


Figura 5.2

La temperatura interna a BTJASPE, misurata dalla termocoppia, rimane circa costante a 20°C finché presenta un leggero innalzamento in corrispondenza del cambiamento della temperatura ambiente.

L'influenza delle variazioni ambientali si hanno sia a livello di misura di temperatura sulle giunzioni sia nella temperatura dell'acqua che scorre nei tubi, che la portano dal bagno di calore a BTJASPE. L'influenza della temperatura ambiente sulla termocoppia comporta variazioni che sono al più uguali a 0,3°C.

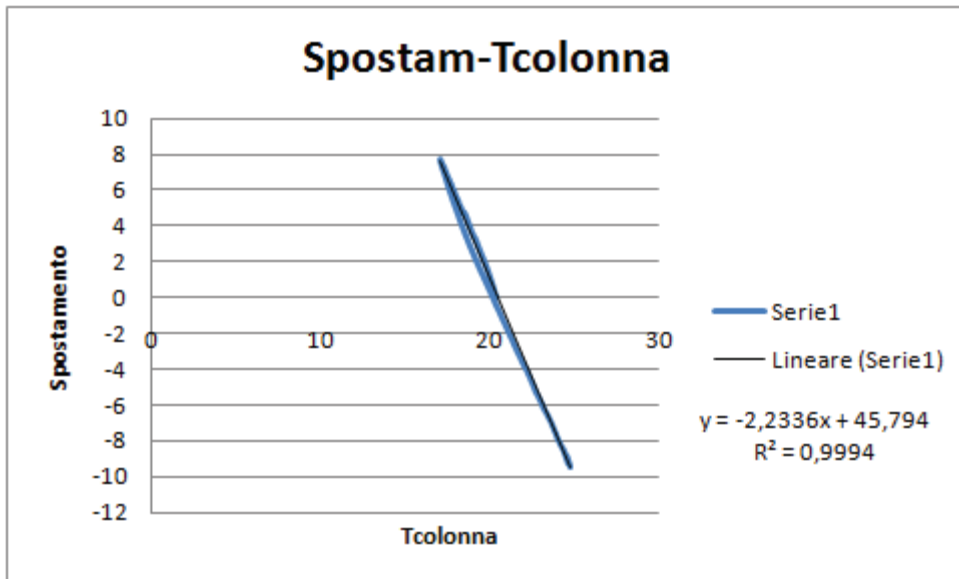


Figura 5.3

Come si può vedere dalla figura 5.3 la pendenza della retta ottenuta dalla combinazione -temperatura colonna - spostamento è circa uguale a quella ottenuta nella prova precedente e ciò è positivo dal punto di vista della precisione dei risultati.

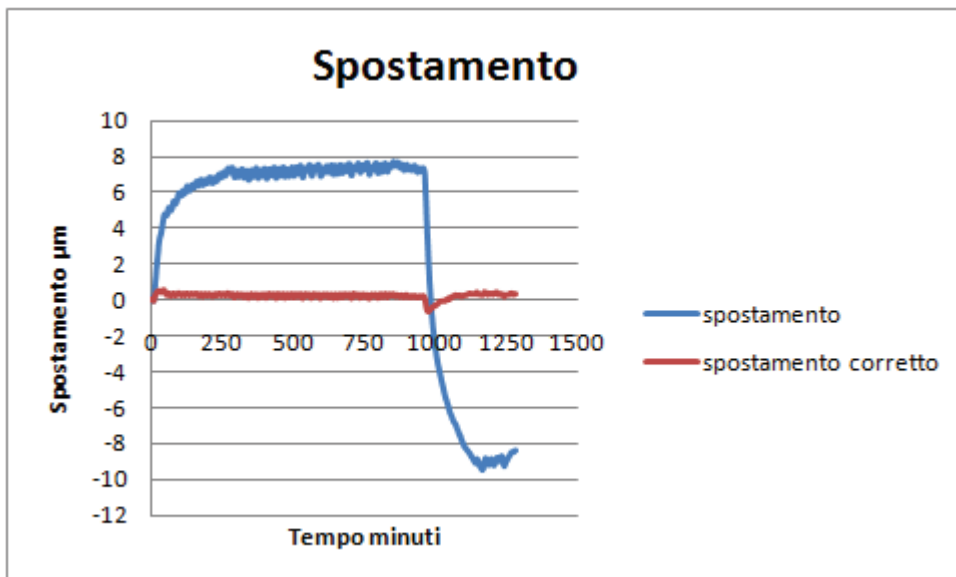


Figura 5.4

Come precedentemente visto gli spostamenti delle colonne sono correlati alle variazioni della temperatura. Anche se tutte isolate, sussiste ancora una zona di transizione sulla curva corretta, nel momento in cui si ha una variazione importante della temperatura ambiente. In questa prova è leggermente più piccolo rispetto a prima, ed essendo dell'ordine di $1\mu\text{m}$ può essere trascurato.

2.2.2.2.2 Influenza della temperatura dell'acqua MC003

PROVA MC003

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 22/10/2010
- Inizio delle misure: 11:07:00 (Durata 4078 minuti)
- Condizioni di prova: Parallelepipedo in silice di 205 mm in BTJASPE; Temperatura acqua variabile (3 quadrati, 2,5 triangoli e n sinusoidi di periodo 1 ora e ampiezza 2°C); Temperatura ambiente costante a 20°C ;
- Scopo della prova: determinare la sensibilità dello spostamento alla variazione della Temperatura dell'acqua.

Si è visto durante le prove MC002 e MC005 che la misura dello spostamento è sensibile alle variazioni di temperatura ambiente, con una misura di temperatura effettuata su una delle colonne di BTJASPE. Si è visto inoltre che sono le deformazioni termiche delle colonne ad essere rilevanti (la base e il pistone superiore non sono più di tanto soggette a deformazioni termiche). È interessante vedere ora se la sensibilità termica del macchinario a variazioni della temperatura dell'acqua è la stessa che si ha in corrispondenza alle variazioni della temperatura ambiente (MC002-MC005).

Con lo scopo di permettere il monitoraggio delle deformazioni del solo macchinario, in risposta ad una sollecitazione termica, è stato mantenuto all'interno di BTJASPE il parallelepipedo di lunghezza 205mm, in silice, caratterizzato da un coefficiente di dilatazione termica nullo. È stato conservato un intervallo di registrazione dei dati di 2 minuti, come nella prova precedente.

Sono stati imposti tre tipi di consegna per la variazione dell'acqua. Questi tre sono stati applicati uno in seguito all'altro.

1- Variazione della temperatura a quadrati (gradini):

Un segnale di consegna quadrato è stato generato attraverso il bagno termostatico. Questo segnale è stato creato tramite la successione di segmenti (fino a 99 possibili). Ogni segmento è definito attraverso la sua temperatura di inizio, quella di fine e la sua durata.

Il ciclo in esame è composto da 5 segmenti, di cui sotto si riporta una rappresentazione. La media della temperatura è stata conservata a 20°C ed è stato scelto un periodo di un'ora. Sono stati programmati 3 cicli.

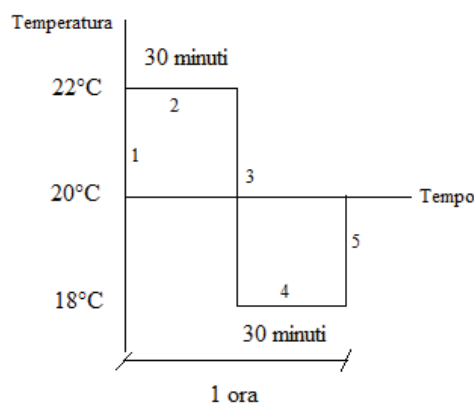


Figura 3.1

Il passaggio di temperatura nei segmenti 1,3,5 è istantaneo per il macchinario, ma non lo è per l'acqua nella realtà (a causa dell'inerzia termica dei 10 litri d'acqua contenuti nel bagno di calore). Ci si aspetterà quindi, nella visualizzazione dei grafici sulla variazione di temperatura dell'acqua, di non trovare un andamento con dei quadrati perfetti, quanto piuttosto un andamento trapezoidale, conseguente ad un ritardo dell'acqua rispetto alla consegna (fig 3.2).

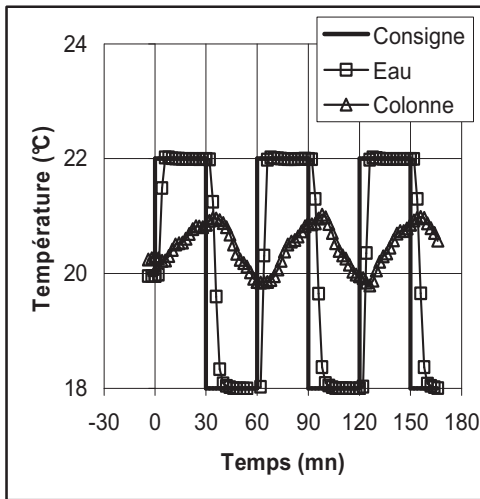


Figura 3.2

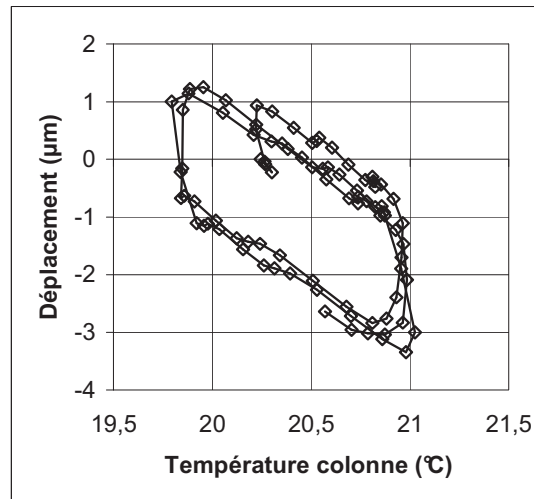


Figura 3.3

N° du segment	T initiale (°C)	T finale (°C)	Durée (mn)
1	20	22	0
2	22	22	30
3	22	18	0
4	18	18	30
5	18	20	0

Tabella 3.1

Durante i tre cicli quadrati, è possibile quantificare la sensibilità dello spostamento alle variazioni di temperatura dell'acqua. La figura 3.3 mostra la registrazione dello spostamento in funzione della temperatura durante questi 3 cicli. Malgrado l'isteresi visibile su questo grafico, è possibile definire 5 parti rettilinee. Tra questi 5 gruppi di punti allineati, le giunzioni comportano solo pochi punti. Questo fenomeno non è ben spiegabile, ma ciò che interessa per lo studio sono solo i punti allineati. Le 5 pendenze delle rette sono uguali (-2,35; -2,26; -2,35; -2,21; -2,31). La media risulta quindi uguale a $-2,3\mu\text{m}/^\circ\text{C}$. Questo valore è molto prossimo a quello che è stato ottenuto con le variazioni della temperatura ambiente e temperatura d'acqua costante. Si decide quindi di adottare un valore medio per realizzare la correzione termica del macchinario, pari a $-2,26\mu\text{m}/^\circ\text{C}$.

2- Variazione della temperatura a triangoli: è stata fatta tramite la programmazione del bagno di circolazione con 3 segmenti, di cui sotto si riporta una rappresentazione.

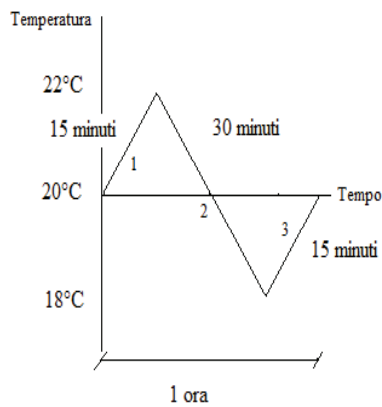


Figura 3.4

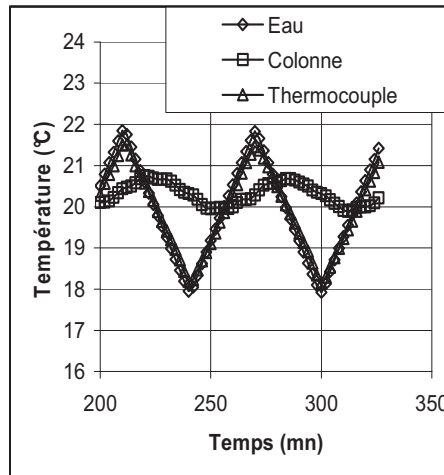


Figura 3.5

N° du segment	T iniziale (°C)	T finale (°C)	Durée (mn)
1	20	22	15
2	22	18	30
3	18	20	15

Tabella 3.2

La risposta della temperatura dell'acqua segue un triangolo, mentre la risposta della temperatura della colonna è piuttosto sinusoidale (fig1.10b). In questa immagine è riportata anche la temperatura della termocoppia, situata all'interno di BTJASPE. Questa segue la temperatura dell'acqua praticamente alla perfezione.

3- Variazione di temperatura sinusoidale: è stata fatta tramite la programmazione del bagno di circolazione con 14 segmenti, di cui sotto si riporta una rappresentazione.

La sinusoide rappresentata ha un periodo di un'ora e ampiezza di 2°C.

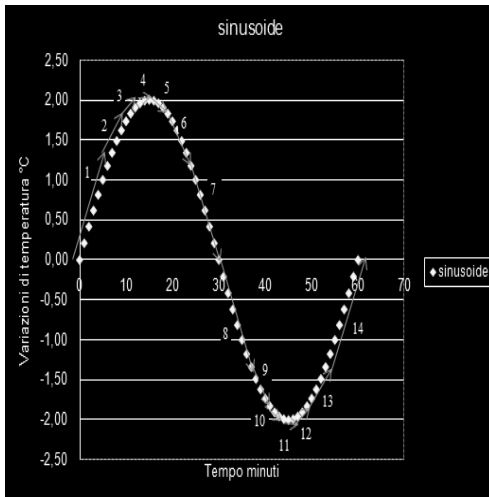


Figura 3.6

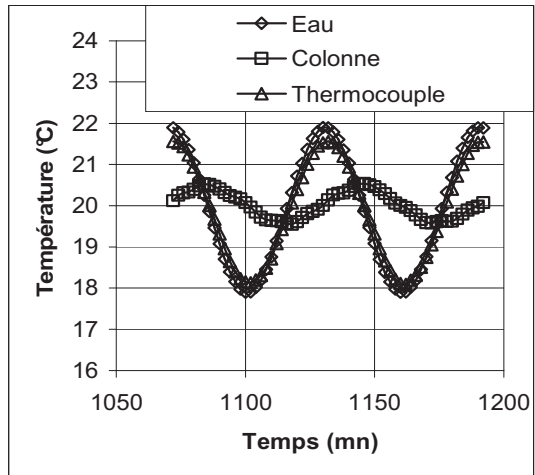


Figura 3.7

N° du segment	T initiale (°C)	T finale (°C)	Durée (mn)
1	20	22,34	7
2	21,34	21,83	4
3	21,83	21,99	3
4	21,99	21,99	2
5	21,99	21,83	3
6	21,83	21,34	4
7	21,34	20	7
8	20	18,66	7
9	18,66	18,17	4
10	18,17	18,01	3
11	18,01	18,01	2
12	18,01	18,17	3
13	18,17	18,66	4
14	18,66	20	7

Tabella 3.3

Qui tutte le risposte della temperatura sono di tipo sinusoidale (fig 1.11b). Questa sollecitazione termica è quella che riesce a dare i gradienti di temperatura più piccoli nel provino di calcestruzzo stesso. Ciò si rende necessario per effettuare delle misure corrette, come si vedrà in seguito.

Si è quindi scelto di realizzare le prove successive con sollecitazioni termiche di tipo sinusoidale.

2.2.2.3 Inerzia termica del sistema e gradienti di temperatura nel provino

A priori non si può conoscere il periodo e l'ampiezza della sollecitazione sinusoidale da applicare, per la determinazione del CDT.

Dopo aver scelto quindi una sollecitazione termica periodica che permette di separare le deformazioni termiche da quelle endogene, e dopo aver pensato alla forma dell'onda e realizzato delle prove per conoscere la risposta del materiale, è conveniente confermare la scelta di periodo e ampiezza per quanto riguarda la sollecitazione termica e studiare il gradiente di temperatura per la determinazione del CDT. Per non avere altre prove da realizzare, si sceglie di effettuare questo studio tramite un approccio numerico.

Ci sono tre punti fondamentali tra i quali si è cercato di raggiungere un compromesso:

- 1- Il periodo della sinusoide scelta dovrà essere sufficientemente corto rispetto ai tempi di sviluppo del ritiro endogeno
- 2- È necessario che l'ampiezza della sinusoide non sia troppo piccola; ciò per evitare misure poco precise
- 3- Il CDT sarà calcolato nei due istanti successivi che corrispondono a una differenza di temperatura nulla tra cuore e pelle e abbastanza vicini in modo da poter supporre che le variazioni del coefficiente CDT non siano troppo importanti tra questi istanti.

2.2.2.3.1 Simulazione della risposta termica

Presentazione del metodo:

Il problema si riconduce allo studio in regime transitorio delle variazioni di temperatura di una massa, con capacità termica data, quando la si sottopone a variazioni di temperatura.

Questa risposta è la soluzione di un'equazione differenziale con secondo membro (la sollecitazione). Il solo parametro da determinare è la costante di tempo τ . La soluzione del sistema differenziale (equazione di Fourier) utilizza il metodo di Eulero che permette di trovare una soluzione passo a passo, anche se il secondo membro è una sollecitazione non semplice (gradini, triangoli, sinusoide). È stato utilizzato un foglio Excel per l'esecuzione della simulazione.

La costante di tempo è ottenuta per aggiustamento, dopo i risultati sperimentali.

In dettaglio:

La simulazione numerica che permette di studiare la risposta termica del provino, è basata sull'equazione di calore in regime transitorio [Boulay,2005]. La temperatura al passo n è calcolata conoscendo quella al passo n-1, in accordo con la seguente espressione:

$$\theta_{x_n} = (1 / \tau) (\theta_{i_{n-1}} - \theta_{x_{n-1}}) \Delta t + \theta_{x_{n-1}}$$

in cui:

- θ_{x_n} rappresenta la temperatura dell'oggetto di cui vogliamo conoscere la variazione all'istante n (nel nostro caso la Temperatura al cuore del calcestruzzo)
- $\theta_{x_{n-1}}$ rappresenta la temperatura dell'oggetto di cui vogliamo conoscere la variazione all'istante n-1
- $\theta_{i_{n-1}}$ rappresenta la temperatura imposta all'istante n-1 (nel nostro caso la Temperatura imposta all'acqua)
- τ è la costante di tempo

Si è creato quindi un foglio Excel per lo svolgimento della simulazione numerica.

Sono stati considerati i dati ottenuti dalla prova MC009; è stato riportato in una colonna il tempo, seguita dalla temperatura dell'acqua; si ha poi la temperatura rilevata dalla termocoppia all'interno del provino, e quindi θ_{x_n} . Nella colonna successiva, è stato calcolato, per ogni istante temporale lo scarto tra temperatura θ_{x_n} e quella rilevata sperimentalmente dalla termocoppia, elevata al quadrato. Il risolutore Excel utilizzato trova la costante di tempo τ da utilizzare nella risoluzione dell'equazione tale per cui la somma degli scarti al quadrato per tutti gli istanti sia la minima possibile.

La costante di tempo τ , calcolata tra acqua e temperatura al cuore del provino, è risultata quindi pari a 9,827 minuti.

Il grafico riportato in seguito dimostra l'esattezza dei risultati forniti dalla simulazione: la curva relativa alla temperatura al cuore del provino e quella ottenuta dalla simulazione risultano molto prossime.

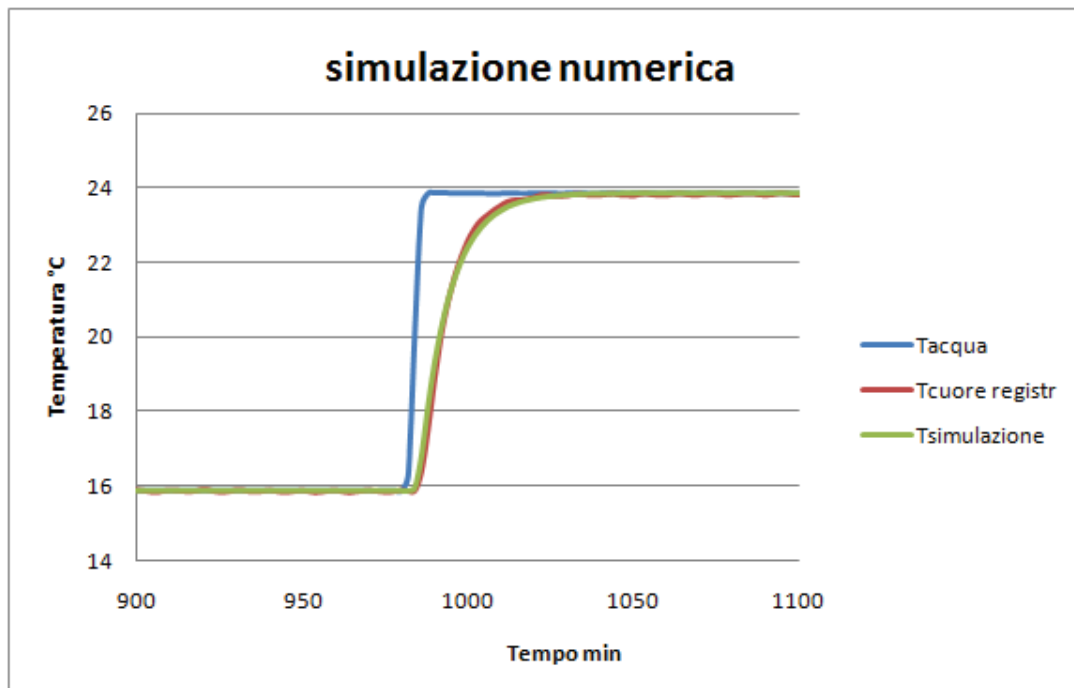


Figura 1.26

Da un punto di vista pratico si constata che la durata per cui la temperatura interna arriva 99% del valore tratto costante, è 5 volte la costante di tempo.

Una volta quindi trovata la costante di tempo, si è passati ad indagare sulle varie tipologie di sinusoidi che si potevano utilizzare. Dapprima però si cercata la costante di tempo relativa al bagno di calore e alla risposta dell'acqua, in modo analogo a quello sopra descritto; questa è risultata essere 1,3 mn.

Con le due costanti di tempo trovate, quindi, si sono costruite due colonne per il calcolo di θ_{x_n} , la prima relativa alla Temperatura dell'acqua e la seconda relativa alla Temperatura al cuore, entrambe dovute alla simulazione numerica. In questo caso come θ_i è stato presa la sinusoide relativa alla variazione dell'acqua nella programmazione del bagno di calore. È stata infine creata una colonna riportante lo scarto tra temperatura dell'acqua (e quindi della pelle) e temperatura al cuore.

Facendo quindi variare il periodo della sinusoide e mantenendo un'ampiezza di 2°C, visto che non si avevano grossi vantaggi con l'utilizzo di un'ampiezza più elevata, come dimostrato in MC007, si sono ottenuti i risultati riportati in tabella sottostante:

A=2°C	
periodo	scarto max
30	1,66
60	1,32
90	1,02
120	0,81
150	0,66
180	0,57

Tabella 1.6

Nella tabella sovrastante si sono riportati i gradienti massimi ottenuti tra temperatura cuore e pelle, al variare del periodo della sinusoide. Si è scelto quindi di continuare le prove con un periodo di 1ora anche se questo non implica avere lo scarto minimo. Questa scelta rientra nel discorso del compromesso che è stato affrontato precedentemente: è necessario avere un periodo corti rispetto alla velocità di sviluppo del ritiro endogeno

2.2.2.3.2 Risposta della temperatura dell'acqua a una consegna imposta MC004

PROVA MC004

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 25/10/2010
- Inizio delle misure: 11:29:20 (Durata 288 minuti)
- Condizioni di prova: Parallelepipedo in silice di 205 mm in BTJASPE; Temperatura acqua variabile (2 sinusoidi di periodo 1 ora e ampiezza 2°C); Temperatura ambiente costante a 20°C;
- Scopo della prova: avvio sincrono tra consegna del bagno termostatico e acquisizione Picolog, per determinare i tempi di risposta stessi, a partire dalla consegna.

La prova MC004, realizzata in condizioni identiche a quelle della prova MC003, è stata realizzata per conoscere la costante di tempo della risposta dell'acqua, quando si applica una consegna sinusoidale (ampiezza 2°C, media 20°C e periodo 1 ora).

È stata programmata una registrazione dei dati ogni 2 minuti. In totale si sono realizzati 2 cicli.

Apparecchiatura utilizzata:

-PT100 nel bagno di circolazione, al fine di verificare se effettivamente la temperatura rilevata dalla sonda di platino varia tra 18°C e 22°C .

-PT100 su una delle 3 colonne, adeguatamente isolata dall'esterno

-termocoppia all'interno di BTJASPE, con lo scopo di misurare la temperatura interna al cilindro in acciaio e vedere come è influenzata da temperatura dell'acqua e temperatura ambiente

-3 captori, che sono stati collegati, come rappresentato nello schema precedente, a un'unica porta che ha per uscita la media dei 3 (figura 1.12).

Le vie quindi utilizzate in PT104 sono quattro, una per ogni acquisizione rilevati dei dati.

Ne risultano quindi i grafici successivi:

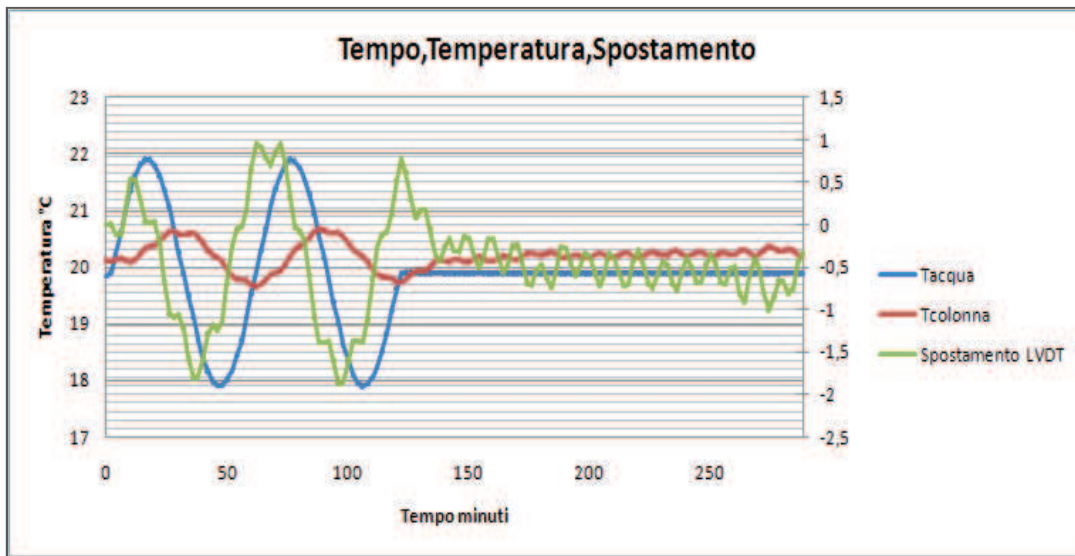


Figura 4.1

Il grafico precedente rappresenta la temperatura dell'acqua, caratterizzata da andamento sinusoidale, con ampiezza 2°C e periodo 1 ora.

Come si può vedere dopo 120 minuti (2 cicli) la variazione ciclica dell'acqua è stata arrestata, mantenendo la temperatura costante a 20°C. La temperatura della colonna mostra andamento sinusoidale ma rispetto a quello dell'acqua risulta sfasato e con ampiezza più piccola. Inoltre questa temperatura è influenzata anche dalla temperatura ambiente (le fluttuazioni dovute alla regolazione della temperatura della sala sono evidenti). Lo sfasamento è evidentemente dovuto all'inerzia termica delle colonne.

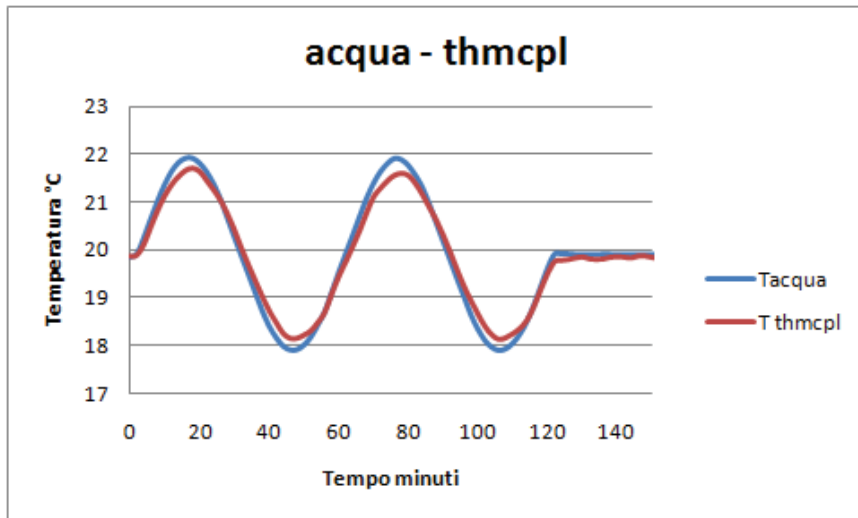


Figura 4.2

È interessante vedere qui come la temperatura interna a BTJASPE (fig. 1.13, thmcpl) segua perfettamente la temperatura dell'acqua. L'effetto delle fluttuazioni della temperatura ambiente sulla misura effettuata dalla termocoppia, è appena visibile.

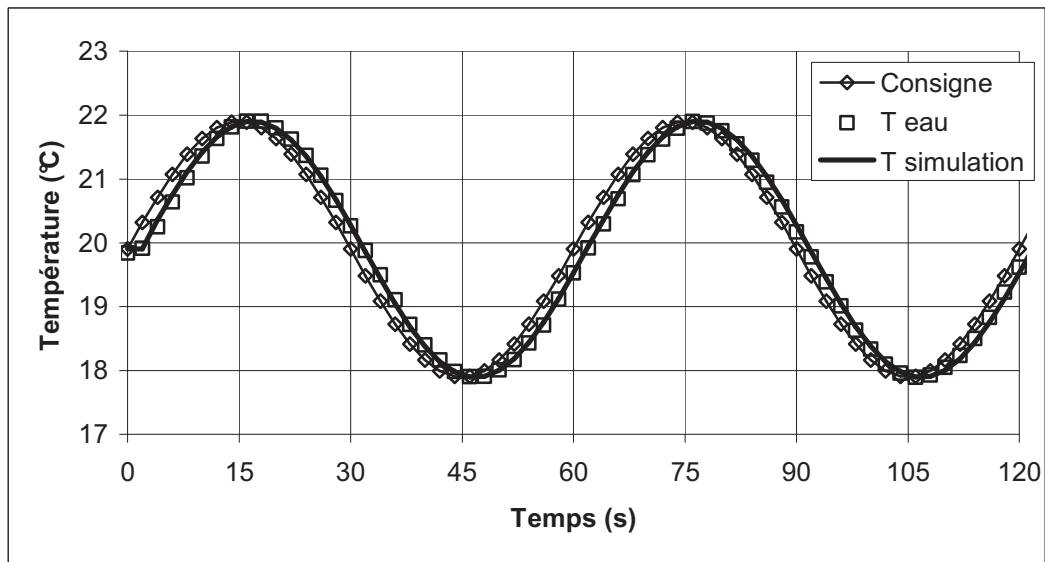


Figura 4.3

Si applica il metodo descritto sopra per determinare la costante di tempo della risposta della temperatura dell'acqua quando una consegna, nello specifico sinusoidale, è applicata. Il grafico 1.14 illustra i risultati ottenuti da questa simulazione. Sono rappresentate la consegna, le misure della temperatura e la simulazione effettuata. La costante di tempo ricavata, con il metodo dei minimi quadrati, risulta di 1,79 minuti. La simulazione descrive alla perfezione i punti sperimentali.

2.2.2.3.3 Risposta della temperatura del provino in funzione della temperatura dell'acqua MC009

PROVA MC009

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 03/11/2010
- Inizio delle misure: 17:25:00
- Condizioni di prova: Temperatura acqua variabile (scala che va da 16°C a 24°C); Temperatura ambiente costante a 20°C;
- Scopo della prova: determinare la sensibilità della termocoppia interna al provino in calcestruzzo (MC006) contenuto in BTJASPE (finora supposta 25°C/V); questa prova permette anche di determinare la costante di tempo che esiste tra le variazioni di temperatura dell'acqua e del provino, in vista della simulazione numerica sulla temperatura (già vista sopra).

La figura sotto riportata (9.1) mostra, come si è già precedentemente osservato, che la risposta della temperatura dell'acqua non segue esattamente la consegna. Inoltre la risposta della temperatura del provino in calcestruzzo è sfasata rispetto a quella della temperatura dell'acqua. Questo tempo di risposta ha un valore più importante per il provino che per l'acqua, malgrado la differenza delle masse (10kg d'acqua, 3,7kg il provino).

Ciò è dovuto al modo di trasferimento del calore: per convezione per quanto riguarda l'acqua, per conduzione per quanto riguarda il provino.

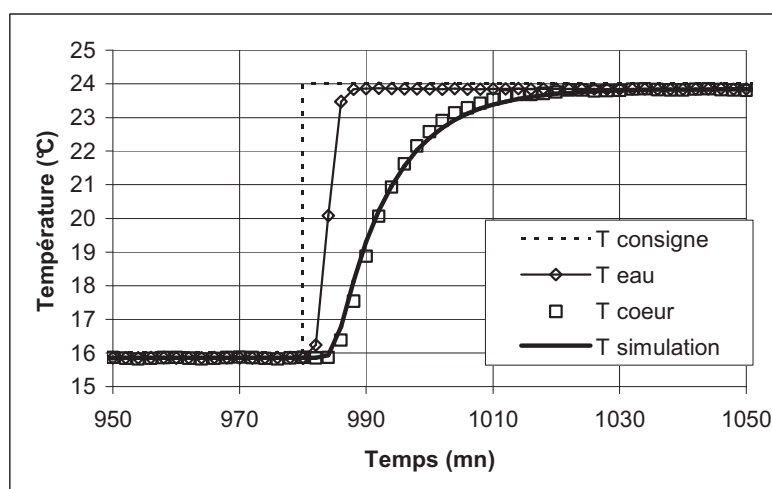


Figura 9.1

La costante di tempo ricavata, secondo il metodo descritto precedentemente, risulta pari a 9,83 minuti. La simulazione si rivela soddisfacente, visto anche la figura sopra riportata.

2.2.2.4. Analisi sperimentale di risposte termiche sinusoidali MC006-MC007-MC008

Sono effettuate tre prove con lo scopo di osservare la risposta termica del dispositivo, avente all'interno un provino in calcestruzzo. Sono stati applicati diverse ampiezze (A) e periodi (T) alla sollecitazione termica sinusoidale, secondo lo schema successivo:

MC006 (A:2°C T:1h)

MC007 (A:4°C T:1h)

MC008 (A:2°C T:2h)

La simulazione termica ricavata precedentemente, sarà riportata per ciascuna prova.

PROVA MC006: Ampiezza 2°C e periodo 1h, con provino in calcestruzzo

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 26/10/2010 15:15 getto
- Inizio delle misure: 16:32:00 (Durata 24 ore)
- Condizioni di prova: 4 litri in calcestruzzo impastati a mano e vibrati in BTJASPE; Temperatura acqua variabile (sinusoide di periodo 1 ora e ampiezza 2°C); Temperatura ambiente costante a 20°C;
- Scopo della prova: questa prova è stata fatta con una massa di calcestruzzo all'interno di BTJASPE e poter quindi fare delle prove termiche.

Le prove precedenti, con l'utilizzazione del parallelepipedo di silice, hanno permesso di arrivare alla caratterizzazione termica del dispositivo, così da essere in grado di separare la deformazione del dispositivo sperimentale da quelle del provino in calcestruzzo. Le prove successive quindi saranno effettuate su provini di calcestruzzo veri e propri.

Il calcestruzzo utilizzato è di tipo ordinario, e presenta la seguente composizione:

	Provenienza / dimensione-	Massa kg/m³
cemento	CEMI 52.5 N PMES CP2 / Lafarge / Le Havre	340
acqua		184,22
sabbia (Senna) granulati (Senna)	Bernières 0/4 Bernières 6,3/20	739,45 1072,14
Totale		2335,81
a/c		0,54

Tabella 6.1

Come riportato in tabella, il rapporto acqua cemento di questo calcestruzzo è 0,54, quindi abbastanza elevato, il che permette una buona lavorabilità, senza l'aggiunta di additivi.

Il calcestruzzo appena pronto è stato posizionato e vibrato all'interno del fusto in acciaio, adeguatamente ricoperto da un film di grasso, per un'altezza di circa 205mm. Si

è poi posizionato il pistone superiore, riposizionati i captori e si è quindi lanciata la prova.

Il tempo di esecuzione della prova è stato 24 ore circa e la registrazione dei dati si è avuta ogni 2 minuti.

Questa prova è fatta per permettere di verificare la risposta termica dell'apparecchiatura con un provino in calcestruzzo colato al suo interno. Alla risposta termica dell'acqua, caratterizzata precedentemente, si potrà aggiungere la risposta termica del provino, per una sollecitazione dovuta alla temperatura dell'acqua stessa.

Per le prove fatte precedentemente su questo macchinario, ci si aspetta di trovare la temperatura al cuore del calcestruzzo che segue la variazione sinusoidale dell'acqua. Ciò si può affermare per gli studi fatti precedentemente [Boulay et al, 2010] con una temperatura d'acqua costante e pari a 20°C. Il risultato è quello riportato in Figura 6.1, che evidenzia una temperatura costante al cuore del provino, malgrado il calore di idratazione del cemento. Ciò è dovuto al fatto che l'acqua che circonda il cilindro in acciaio riesce ad annullare il gradiente termico che si forma nel provino a causa della presa: il cuore del provino si mantiene perfettamente a 20°C.

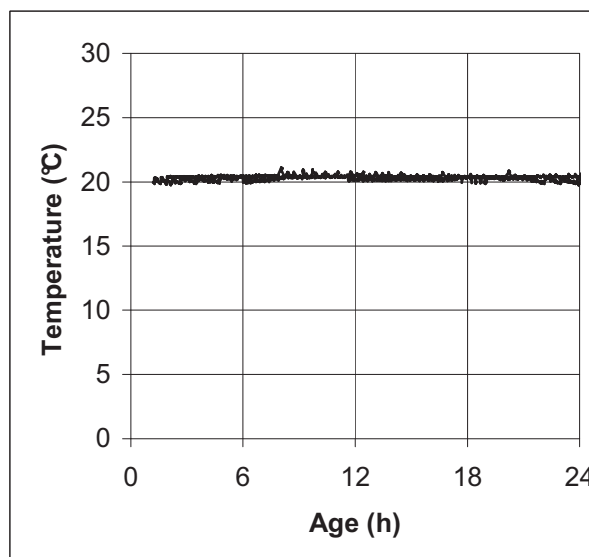


Figura 6.1

Si può immaginare che per una storia sinusoidale della temperatura dell'acqua, la performance termica del cilindro in acciaio di BTJASPE sia altrettanto buona, rispetto a quella in cui la temperatura dell'acqua si manteneva costante a 20°C.

I grafici successivi riportano le differenti osservazioni effettuate, per questo tipo di sollecitazione:

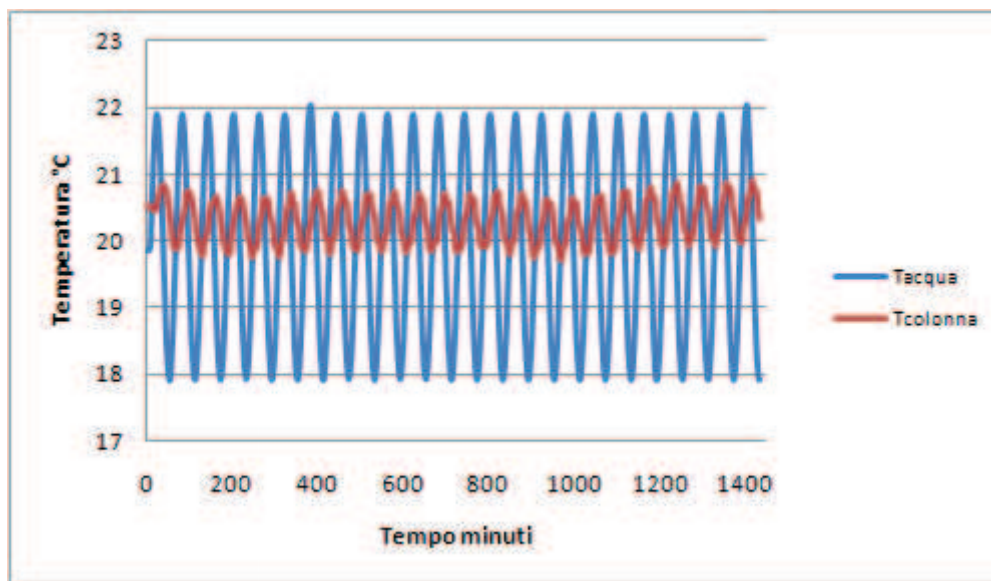


Figura 6.2

Dal precedente grafico si può vedere come la variazione della temperatura della colonna sia influenzata da quella dell'acqua, essendo la temperatura ambiente costante a 20°C.

Le due sinusoidi che descrivono i comportamenti di acqua e colonne sono leggermente sfasate, a causa dell'inerzia termica delle colonne stesse.

Delle leggere fluttuazioni sono visibili sulla temperatura delle colonne: sono dovute alla regolazione della temperatura della sala. Lo sfasamento e le fluttuazioni risultano avere un'importanza molto ridotta quando si opera la correzione termica sulle colonne, dello spostamento misurato.

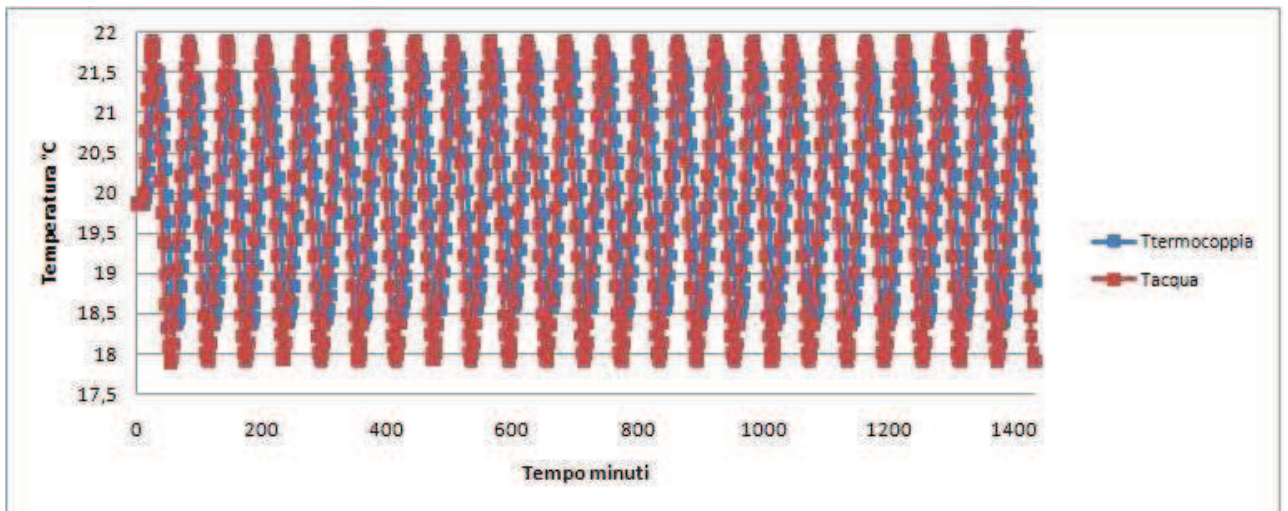


Figura 6.3

Nel grafico precedente si sono messi in relazione la temperatura dell'acqua e del cuore del provino, rilevata con la termocoppia. Per una migliore comprensione del comportamento delle due temperature, si riporta in seguito uno zoom del grafico (figura 6.4)

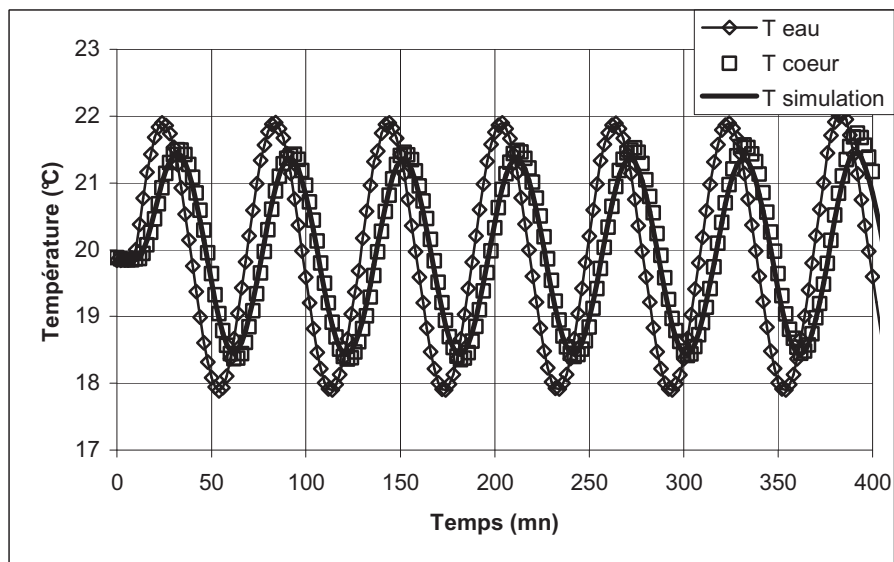


Figura 6.4

Come si può vedere, la variazione della temperatura al cuore del provino risulta descritta da una sinusoide, leggermente sfasata rispetto a quella dell'acqua. Ciò è dovuto

all'inerzia termica del provino, essenzialmente governata da trasferimento di calore per conduzione. Inoltre l'onda sinusoidale descritta dalla termocoppia, presenta un'ampiezza inferiore a quella dell'acqua. Ciò è dovuto al fatto che il picco raggiunto dall'acqua è mantenuto per troppo poco tempo e quindi il cuore del calcestruzzo non riesce a raggiungere questa temperatura. Nella prova successiva, (MC008), quindi, per cercare di risolvere questo inconveniente, si è programmata una variazione dell'acqua con una sinusoide di ampiezza uguale a questa ma di periodo doppio (2 ore). Il calcolo termico effettuato con la costante di tempo ottenuta dalla prova MC009 risulta ancora molto buono.

Anche se lo scopo principale delle prove MC006, MC007, MC008 è lo studio del comportamento termico del provino quando sottoposto ad una sollecitazione termica di tipo sinusoidale, ci si è interessati anche agli spostamenti registrati:

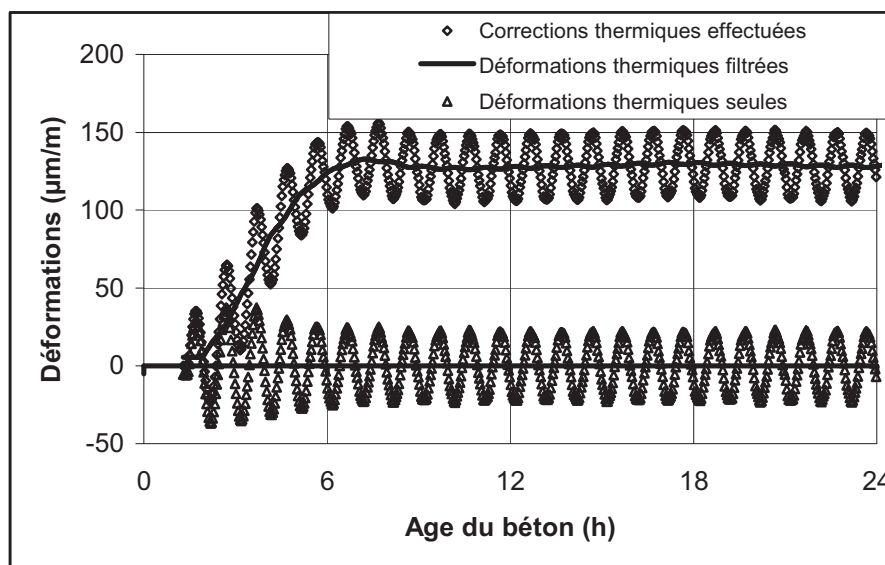


Figura 6.5

Si è rilevato un piccolo inconveniente per le misure dello spostamento. Prima dell'inizio della prova, infatti, i 3 LVDT sono stati regolati in modo che il segnale di uscita del condizionatore fosse molto prossimo a 2,5V, che si ricorda essere la tensione massima d'entrata di PT104. Il gonfiamento iniziale del calcestruzzo ha fatto "uscire" il segnale da questo range di tensione limite (2,563V). Nonostante ciò, comunque, sono state registrate tutte le variazioni e sembrano nella norma.

Per questa prova, gli spostamenti registrati non sono dovuti solo a deformazioni termiche di BTJASPE, ma anche alle deformazioni endogene del calcestruzzo (figura 1.19). Per disaccoppiare e separare questi effetti, si corregge innanzitutto lo spostamento misurato, come precedentemente spiegato, grazie alla misura della temperatura delle colonne.

In questo modo, le fluttuazioni, dovute alla temperatura ambiente ed alla temperatura dell'acqua, vengono eliminate. Per il disaccoppiamento vero e proprio si considera che, sulla durata di un ciclo, l'evoluzione del ritiro endogeno è piccola, cosicché se si effettua la media dei valori sulla lunghezza di un ciclo, le ondulazioni termiche possono considerarsi eliminate.

La differenza tra le due prime curve permette di ricavare le sole deformazioni termiche. Questo procedimento, che isola le deformazioni termiche, permette di calcolare il CDT.

Per quel che riguarda la parte endogena della deformazione, è interessante vedere che c'è un aumento dello spostamento dall'inizio della prova fino a un tempo di 5 ore circa. Questo spostamento positivo è indicativo della posizione in estensione dei captori, e ciò non può essere dovuto ad altro se non a un gonfiamento del provino. Il rapporto abbastanza elevato di a/c , senza dubbio, può essere considerato la causa del rigonfiamento del calcestruzzo nelle prime ore dopo il getto. Questo fenomeno è stato rilevato anche nelle prove seguenti (MC010-MC011).

Il gonfiamento registrato in questo è antecedente alla presa del materiale. Per questo materiale si vede che quest'ultima si attua all'incirca verso le 5,5 ore (330 minuti). Passato questo tempo, quindi, c'è una stabilizzazione delle deformazioni attorno a $25\mu\text{m}/\text{m}$ e ciò è indicativo della presa stessa. Bisogna sottolineare che le misure lineari effettuate su un provino in cui è in corso la presa, non sono così affidabili come quelle che si possono registrare nel post presa, quando il materiale può essere considerato un solido vero e proprio.

Prima della presa infatti questo tipo di misure non sono veritiere in quanto il materiale è ancora plastico, e quindi soggetto ad assestamenti e fenomeni di deposito ed essudazione (tutta la deformazione volumica si andrà a concentrare in direzione verticale, in quanto il cilindro in acciaio impone la sua forma al calcestruzzo e quindi in

direzione orizzontale gli spostamenti non saranno molto significativi); in questo stadio le sole misure volumiche avrebbero un senso.

PROVA MC007: Ampiezza 4°C, periodo 1h, con lo stesso provino di MC006

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 26/10/2010 15:15getto
- Inizio delle misure: 28/10/2010 11:32:00 (circa 44 ore dopo il getto)
- Condizioni di prova: prova con calcestruzzo di MC006; Tacqua variabile con una sinusoide di Ampiezza 4°C e periodo 1 ora; Tambiente costante a 20°C.
- Scopo della prova: questa prova è stata fatta per avere un'idea dell'importanza della variazione di ampiezza che caratterizza la sinusoide con cui varia la temperatura dell'acqua.

Si è scelto quindi di vedere se un cambiamento dell'ampiezza della sinusoide da 2°C a 4°C comportasse delle miglorie nello studio del problema. Si è quindi mantenuto il periodo della sinusoide a 1h ma si è impostata una variazione di temperatura tra 16°C e 24°C. La temperatura ambiente è stata mantenuta costante a 20°C.

I risultati ottenuti portano dei miglioramenti nel rilevamento dei dati, ma non così importanti da considerare per le prove successive un'ampiezza di 4°C piuttosto di una di 2°C.

Nel seguente grafico è riportato quindi l'andamento della temperatura al cuore del provino rilevato in MC007:

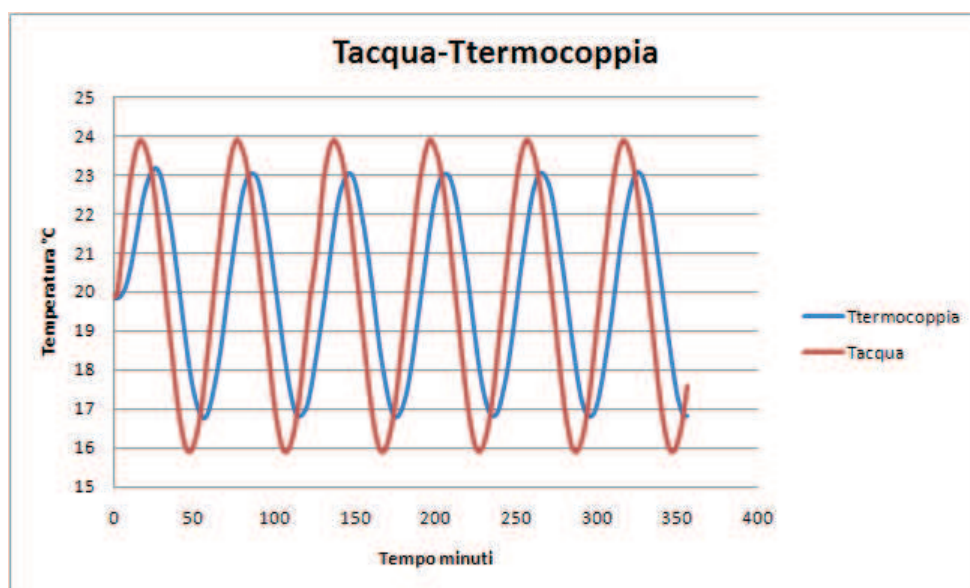


Figura 7.1

Il grafico precedente dimostra chiaramente come la temperatura al cuore del calcestruzzo non raggiunga mai la temperatura dell'acqua, ma ci sia uno scarto di circa 1°C tra le due, oltre ovviamente allo sfasamento dovuto al tempo di risposta del calcestruzzo.

Il confronto tra le prove MC006 ed MC007 è riportato nel grafico seguente, dove sono messe a confronto le temperature raggiunte al cuore del provino nelle due prove; la prova MC006 raggiunge praticamente i 22°C e la prova MC007 i 23,2°C. Si ricorda però che nella prima prova la temperatura massima raggiunta dell'acqua era 22°C, mentre nella seconda prova 24°C.

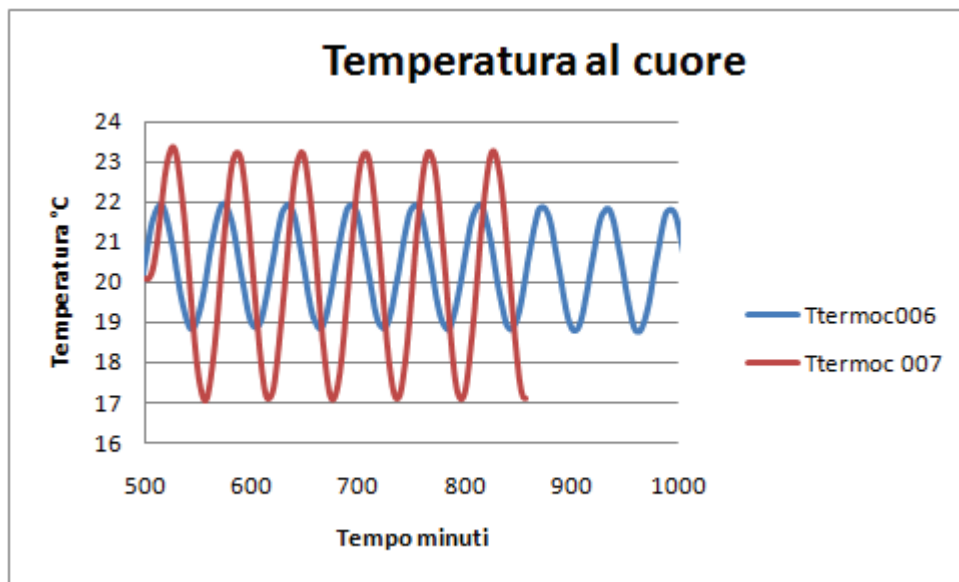


Figura 7.2

Si è deciso quindi di realizzare un'altra prova per studiare la temperatura raggiungibile al cuore del provino. Nella prova MC008, infatti, si è imposto un periodo di 2ore con un'ampiezza della sinusoide di 2°C. Si è infatti ipotizzato che la temperatura del provino non raggiungesse perfettamente quella dell'acqua perché il picco massimo (o minimo) non fosse mantenuto nell'acqua per un tempo sufficientemente lungo da permettere anche al calcestruzzo di raggiungere la temperatura desiderata.

PROVA MC008: Ampiezza 2°C, periodo 2h , con lo stesso provino di MC006

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 26/10/2010 15:15 getto
- Inizio delle misure: 29/10/2010 16:22:00 (circa 72 ore dopo il getto)
- Condizioni di prova: prova con calcestruzzo di MC006; Tacqua variabile con una sinusoide di Ampiezza 2°C e periodo 2 ore; Tambiente costante a 20°C.
- Scopo della prova: questa prova è stata fatta per avere un'idea dell'importanza della variazione del periodo che caratterizza la sinusoide con cui varia la temperatura dell'acqua.

Come si è precedentemente detto si è provveduto a realizzare una prova con una variazione di temperatura che avesse un periodo doppio rispetto a quello della sinusoide precedentemente utilizzata. La variazione della temperatura sarà sempre tra i 18 e i 22°C, e quindi l'ampiezza della sinusoide sarà la stessa di quella usata nelle prove precedenti, ma il periodo sarà di 2ore.

Si riporta nella figura successiva (Figura 1.22) l'andamento della nuova sinusoide con i 14 segmenti utilizzati per la programmazione del bagno di circolazione:

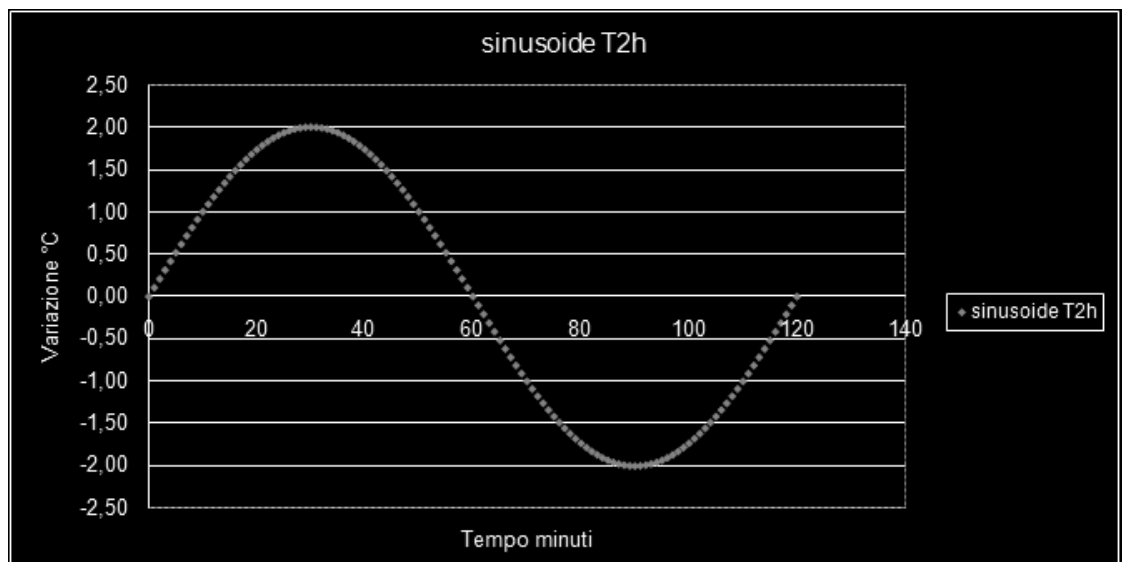


Figura 8.1

	T iniziale (°C)	T finale (°C)	Durée (mn)
1	20	21,09	11
2	21,09	21,73	9
3	21,73	21,98	7
4	21,98	21,98	6
5	21,98	21,73	7
6	21,73	21,09	9
7	21,09	20	11
8	20	18,91	11
9	18,91	18,27	9
10	18,27	18,02	7
11	18,02	18,02	6
12	18,02	18,27	7
13	18,27	18,91	9
14	18,91	20	11

Tabella 8.1

La prova è stata effettuata a circa 72 ore dal momento in cui è stato colato il calcestruzzo; ci si aspetterà quindi di vedere una stabilizzazione dei parametri riguardanti lo spostamento e il coefficiente di dilatazione termica. Si sono ottenuti quindi i seguenti grafici:

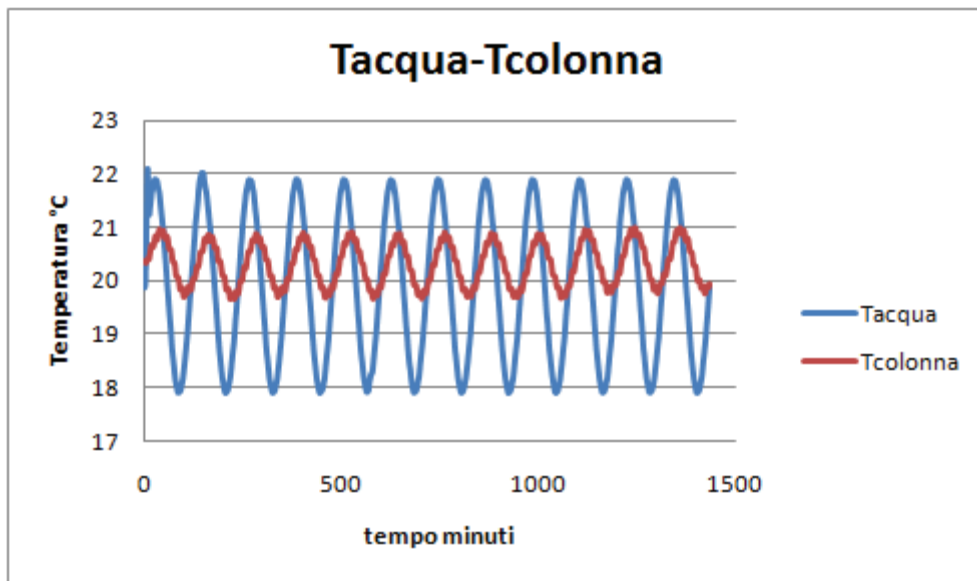


Figura 8.2

Nel seguente grafico si sono messe in relazione le temperatura di acqua e colonna in funzione del tempo. L'andamento è lo stesso che si è rilevato nelle prove precedenti, anche se il raddoppiare del periodo della variazione dell'acqua provoca un leggero amplificarsi della risposta termica della colonna.

Ciò su cui premeva però indagare era la variazione della temperatura al cuore del provino, in relazione alla risposta dell'acqua. Si è ottenuto dunque che con un periodo più alto, il calcestruzzo ha la possibilità di raggiungere circa le temperature massime che assume l'acqua, cosa che non succedeva con il periodi più bassi, in cui la temperatura massima del calcestruzzo restava al di sotto di quella dell'acqua. Ciò che è stato quindi registrato dalla prova è riportato nel grafico seguente (Figura 1.24), in cui si è fatto uno zoom temporale dei dati registrati:

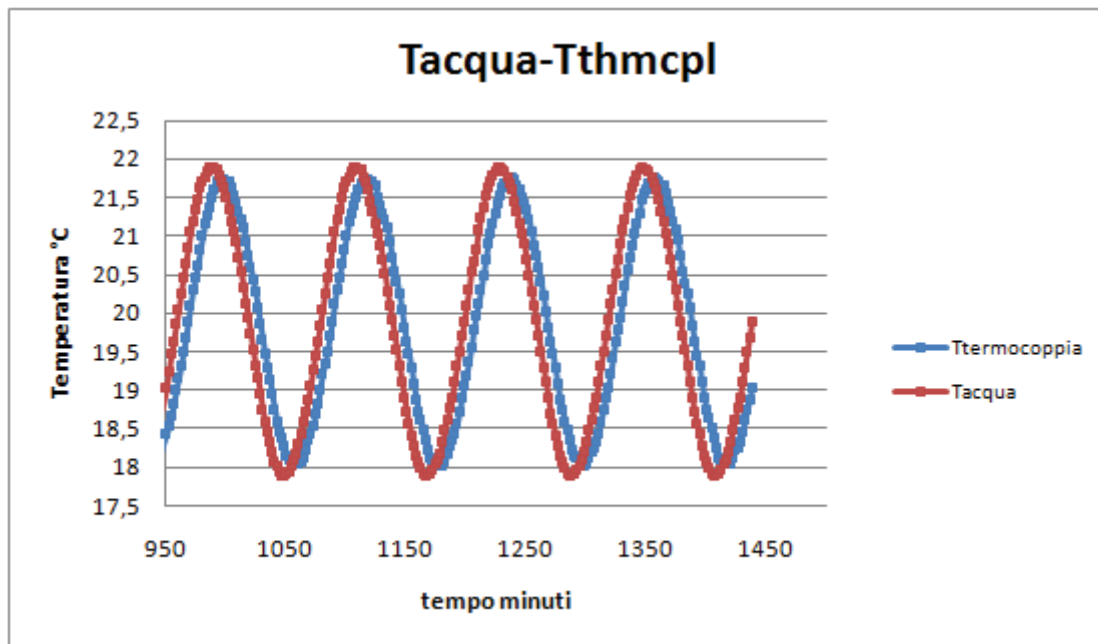


Figura 8.3

Come si vede quindi dal grafico il cuore del calcestruzzo raggiunge la temperatura dell'acqua, sempre con un certo sfasamento, dovuto all'inerzia termica del calcestruzzo. Questo è dovuto al fatto che raddoppiando il periodo dell'onda sinusoidale caratteristica della temperatura dell'acqua, le velocità di variazione della temperatura dell'acqua stessa sono minori e quindi gli scambi termici più completi. È possibile quindi avere nel calcestruzzo un'ampiezza di temperature più elevata. La sensibilità del calcestruzzo alle basse temperature è messa più in evidenza ora rispetto a prima: la temperatura minima raggiunta dal calcestruzzo è ora di circa 18,2°C e nella prova precedente era di circa 18,7°C.

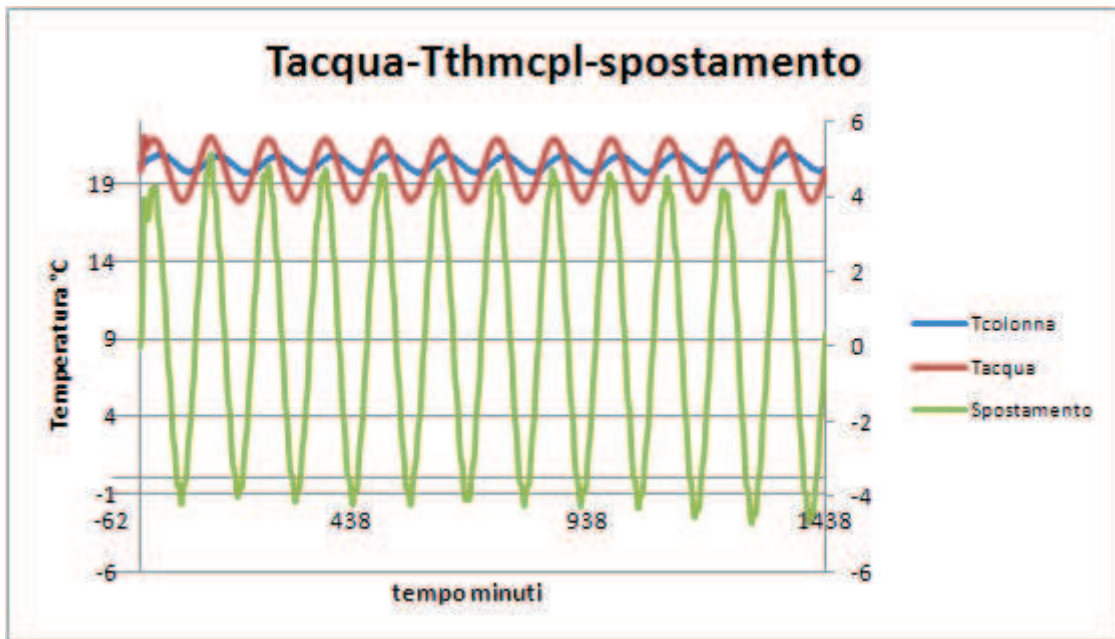


Figura 8.4

A conferma di quello che si è accennato precedentemente, si può vedere come gli spostamenti si siano assestati per tutto l'arco della prova. Si vede inoltre come a spostamenti negativi corrispondano temperature crescenti della colonna e quindi dilatazioni.

Anche in questa prova si è calcolato uno spostamento corretto, il cui andamento è riportato nel grafico seguente e messo a confronto con lo spostamento ricavato senza alcuna correzione. Si ricorda che la correzione dello spostamento è stata fatta tenendo conto di una sensibilità delle colonne alla temperatura di $-2,23\mu\text{m}/^\circ\text{C}$, come è stato ricavato dalle prove precedenti.

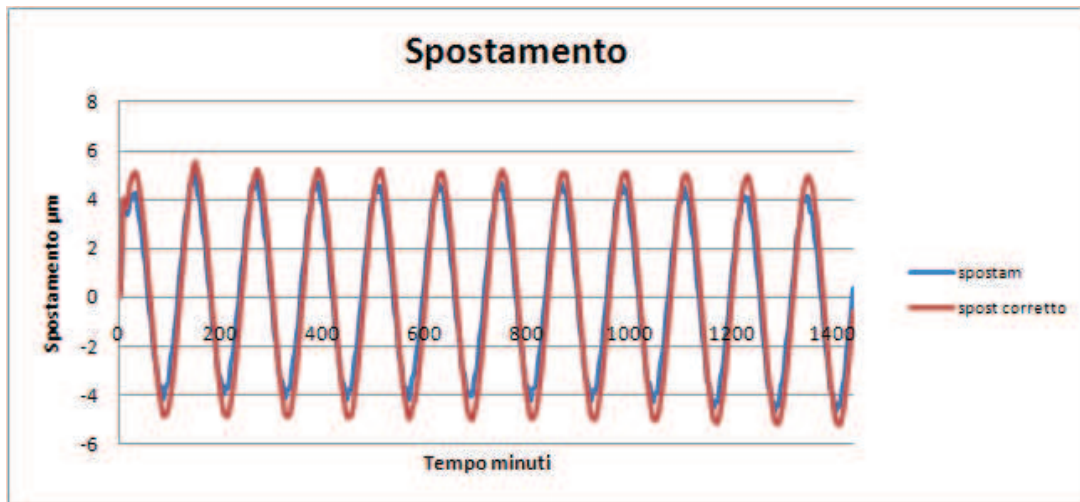


Figura 8.5

Conclusione: queste prove termiche hanno permesso di fornire una base di dati significativi per la comprensione del funzionamento termico di BTJASPE. Tra le ampiezze e i periodi delle onde sinusoidali applicate, si può già ora ritenere che un' ampiezza di 2°C e un periodo di 1 ora siano corretti per la determinazione del coefficiente di dilatazione termica. Queste prove permettono anche di conoscere le costanti di tempo necessarie per poter fare delle previsioni con delle diverse ampiezze e periodi, senza dover fare prove supplementari.

2.2.2.5 Simulazione termica

Per avere un riscontro su quanto detto in precedenza a riguardo degli istanti a gradiente nullo, si è ritenuto di fare una simulazione termica sulle dinamiche della prova.

Questa è stata effettuata da Erick Merliot, con l'utilizzo del programma Flow Simulation associato a Solid Work.

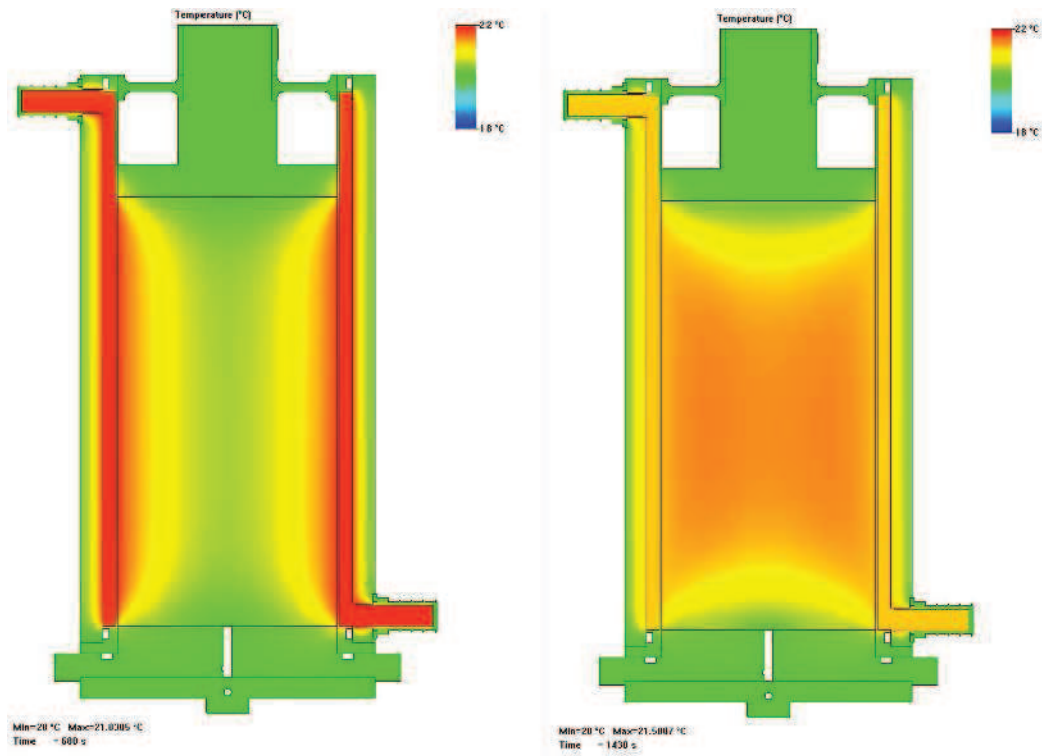
È stato quindi rappresentato il macchinario utilizzato, BTJASE, con all'interno il calcestruzzo, ed è stata registrata la variazione di temperatura nell'insieme, al variare della temperatura dell'acqua.

Sono state quindi registrate le variazioni di temperatura per un intero periodo, di 1 ora, caratterizzante la variazione di temperatura dell'acqua, tra 18°C e 22°C.

Il software è stato programmato in modo tale che, durante il periodo di studio, ogni 10 secondi fosse salvato un fotogramma che rappresenta la situazione in corso, dal punto di vista della temperatura.

Così facendo è possibile avere visivamente e rapidamente una stima del gradiente che si ha tra cuore e pelle, all'istante considerato. Si ricorda infatti che per il calcolo del CDT, si è scelto di considerare le deformazioni e le temperature nell'istante in cui il gradiente tra pelle e cuore fosse il più piccolo possibile. In ciascun ciclo gli istanti in cui avviene ciò, sono 2.

In seguito quindi si riportano 2 immagini di cui una che evidenzia una differenza di temperatura tra cuore e pelle e l'altra relativa all'istante in cui il gradiente è pressoché nullo.



Figural.27

È stato inoltre costruito un grafico, con i dati ricavati dallo studio termico, rappresentativo della variazione di temperatura lungo una linea immaginaria che attraversa orizzontalmente il provino stesso; nei seguenti grafici quindi si leggerà sull'asse delle ordinate la temperatura in °C e sull'asse delle ascisse la posizione in cui si pone a misurare tale temperatura, rispetto allo zero, posto al centro del provino. Il massimo valore di ascissa che verrà si avrà sarà di 50mm, pari al raggio del provino stesso.

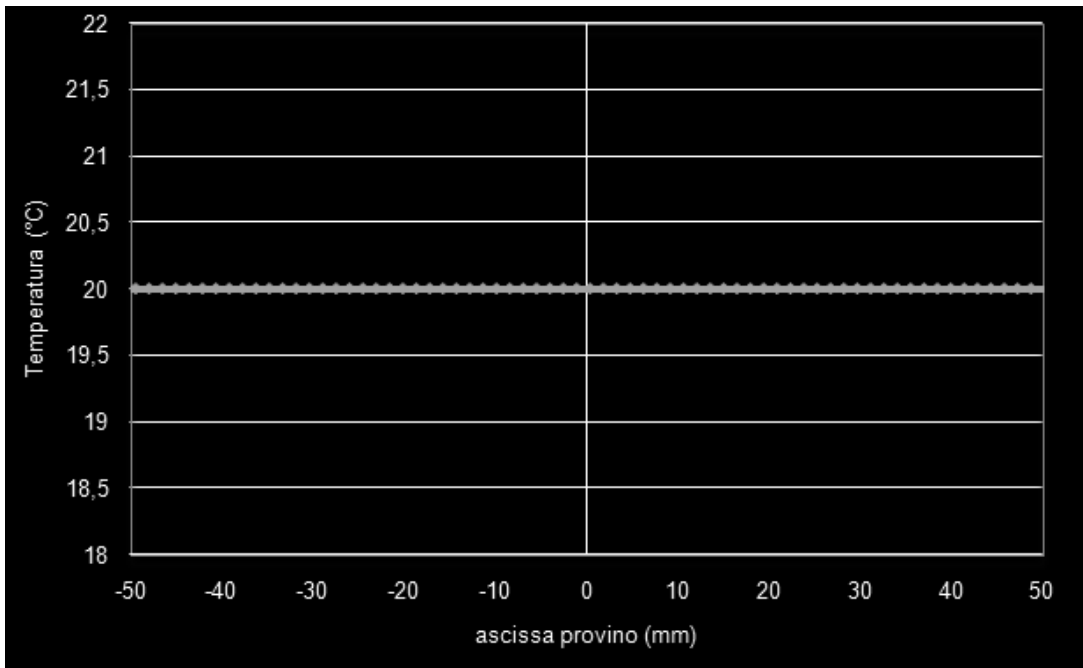


Figura1.28

Nell'immagine precedente è rappresentato l'istante 0, in cui sia temperatura di cuore che di pelle sono a 20°C. Dopo 900 secondi lo scarto di temperatura tra cuore e pelle è massimo: il primo è a 22°C mentre il centro del provino ha una temperatura inferiore di circa 1°C, come rappresentato nella figura sottostante.

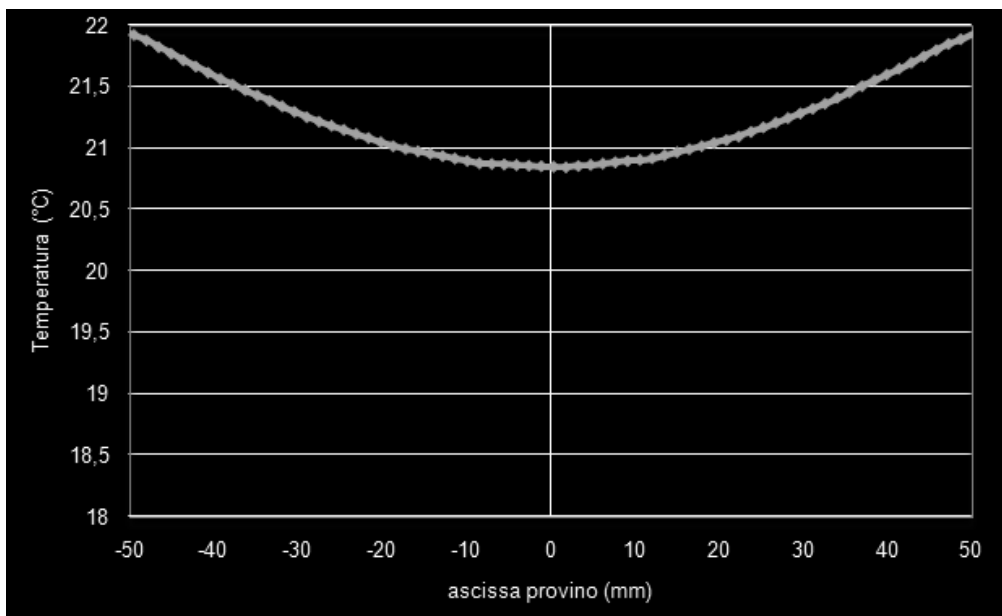


Figura1.29

Si analizza infine l'istante in cui il gradiente è pressoché nullo:

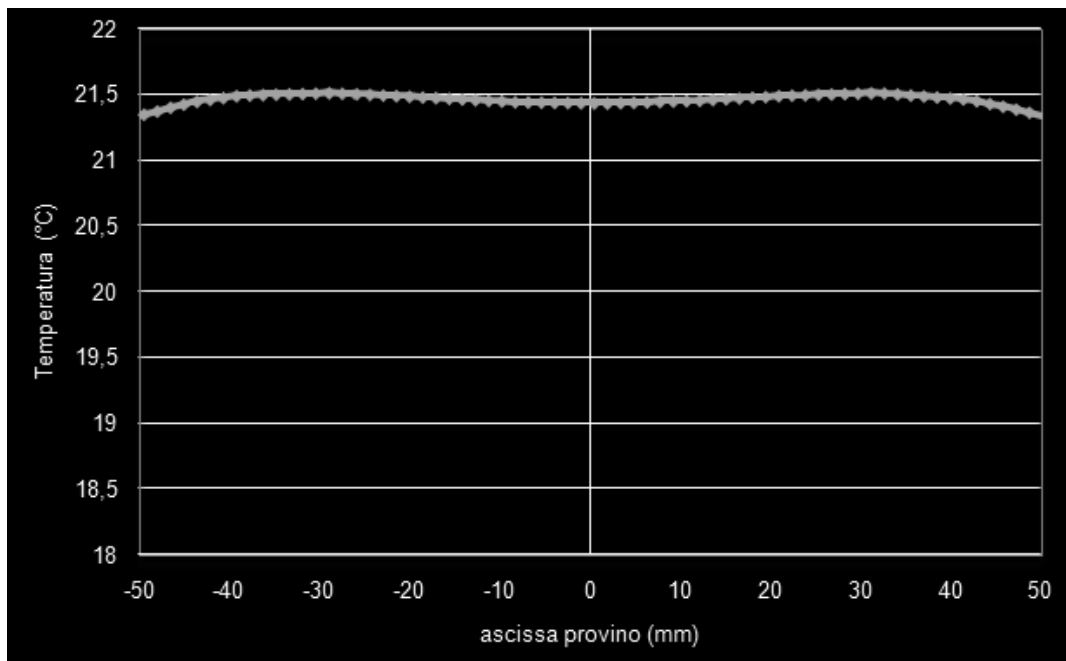


Figura1.30

La temperatura rilevata al cuore è di $21,47^{\circ}\text{C}$, mentre quella di pelle di $21,37^{\circ}\text{C}$. Lo scarto di temperatura tra interno ed esterno è quindi di $0,10^{\circ}\text{C}$. la differenza di temperatura è dunque talmente piccola che è possibile trascurarla, e quindi assumere questo istante come quello in cui si ha l'equilibrio termico del provino ed è quindi possibile calcolare correttamente il CDT.

Prima di passare a vedere il calcolo del CDT, è importante sottolineare che dalla simulazione termica è stato possibile vedere come ci fossero dei gradienti di temperatura dell'acqua tra l'uscita del bagno di calore e l'ingresso di BTJASPE. È allora stata effettuata una prova per verificare l'entità di questi gradienti, che si sono dimostrati comunque trascurabili.

2.2.2.5.1 Gradiente di temperatura tra bagno termostatico e BTJASPE MC012

PROVA MC012:

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 22/11/2010
- Inizio delle misure: 10:40:00
- Condizioni di prova: Tacqua variabile con una sinusoide di Ampiezza 2°C e periodo 1 ora, tra 18°C e 22°C; Tambiente costante a 20°C.
- Scopo della prova: valutazione del gradiente termico tra bagno di calore ed entrata BTJASPE

Dopo aver effettuato degli studi a livello termico come detto in precedenza, si è notato che c'era la possibilità fosse presente una perdita in termini di temperatura tra il bagno di calore e l'ingresso in BTJASPE.

Si è quindi fatta una prova per quantificare questo ΔT . Con una PT100 posizionata all'ingresso del cilindro in acciaio di BTJASPE si è misurata la temperatura dell'acqua, e quindi la differenza di temperatura rilevata dalla PT100 posizionata all'interno del bagno di circolazione. I risultati sono riportati nel grafico successivo:

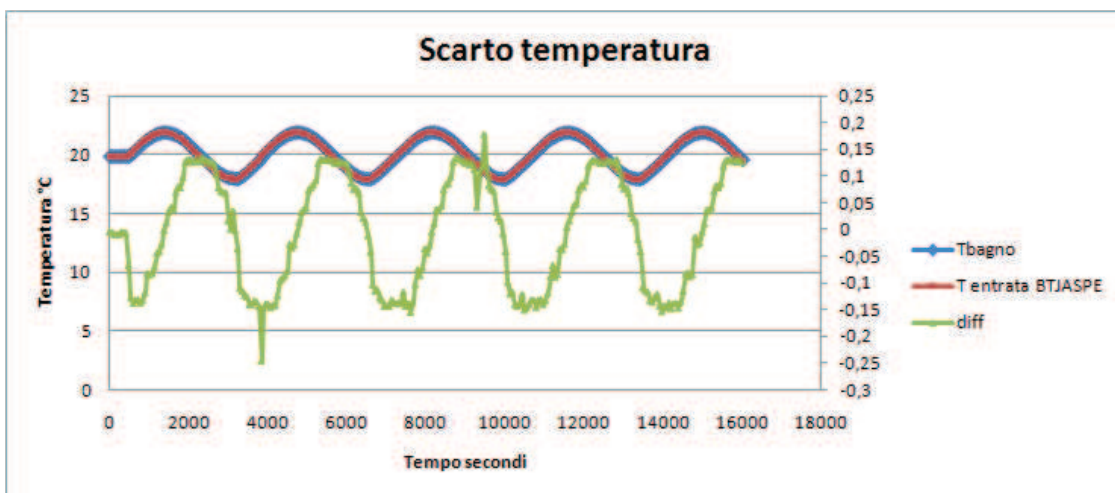


Figura 12.1

Come si vede dal grafico lo scarto massimo di temperatura tra bagno di calore ed entrata di BTJASPE è dell'ordine di $0,3^{\circ}\text{C}$ per un semi periodo, e quindi per 30 minuti. Le prossime prove quindi verranno effettuate rilevando la temperatura all'entrata di BTJASPE, e non più quella del bagno di calore.

2.2.2.6 Monitoraggio del CDT nel calcestruzzo MC006-MC008-MC010-MC011-MC013

PROVA MC006: Ampiezza 2°C e periodo 1h, con provino in calcestruzzo

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 26/10/2010 15:15 getto
- Inizio delle misure: 16:32:00 (Durata 24 ore)
- Condizioni di prova: 4 litri in calcestruzzo impastati a mano e vibrati. in BTJASPE; Temperatura acqua variabile (sinusoide di periodo 1 ora e ampiezza 2°C); Temperatura ambiente costante a 20°C;
- Scopo della prova: prima valutazione del CDT.

Come già detto in precedenza, la figura successiva (figura 6.4) mostra per la prova MC006, l'evoluzione della temperatura dell'acqua, della temperatura al cuore del provino e della deformazione tre 5 e 10 ore.

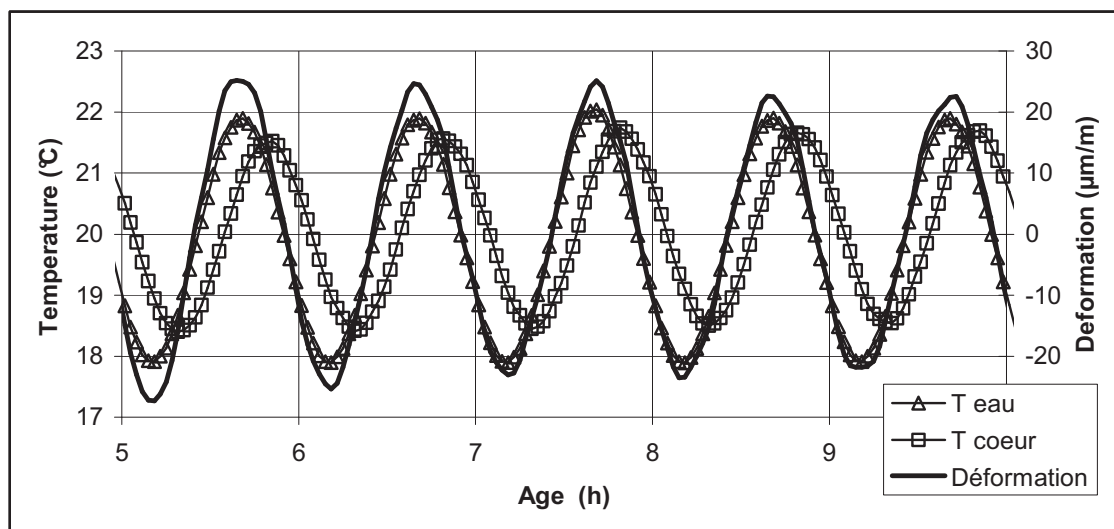


Figura 6.4

Si osserva che lo spostamento è relativamente sincrono alla temperatura dell'acqua. Lo sfasamento tra temperatura dell'acqua e temperatura del cuore, invece, indica che non si ha omogeneità delle temperature di cuore e esse allo stesso istante temporale. Si è dunque fatta una prima valutazione del CDT del calcestruzzo, considerando i valori di temperatura e deformazione all'istante in cui temperature di acqua e cuore sono uguali

(2 volte per ciclo), come è possibile vedere nel grafico sopra riportato. Il CDT è stato calcolato come segue:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{T_1 - T_2}$$

Espressione in cui ε_1 e ε_2 sono le deformazioni agli istanti successivi t_n e t_{n+1} per i quali, il gradiente cuore pelle è nullo e T_1 e T_2 sono le temperature medie tra cuore e pelle agli stessi istanti.

Si ottengono quindi i seguenti tabella e grafico:

(m)	1cycle=60min	°C	°C	ϵ 2($\mu\text{m}/\text{m}$)	ϵ 1 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$\mu\text{m}/\text{m}/\text{°C}$
l provino	cycle	Tmin cls	Tmax cls	def cls	def cls	alpha CDT
0,205	1	18,4430116	21,4965405	23,8203537	36,102378	19,6240916
	2	18,3582263	21,4280136	6,62135366	67,0203293	23,989181
	3	18,3582263	21,4593059	27,6428902	104,336329	24,7312066
	4	18,3489406	21,4861577	71,1356707	130,822012	19,0252504
	5	18,3989985	21,5243316	95,6907439	148,067232	16,7586897
	6	18,4115343	21,5692885	113,29011	158,743732	14,3942875
	7	18,446422	21,7461781	110,729439	161,225902	15,3030898
	8	18,5022373	21,6607716	109,799024	155,036037	14,3221532
	9	18,5427807	21,6941215	107,189207	153,492134	14,6930877
	10	18,5411036	22,2543475	108,557793	153,859354	12,199996
	11	18,5814515	21,6930595	109,353293	153,265049	14,1122391
	12	18,5554664	21,6849311	110,238354	154,00211	13,9844225
	13	18,5642524	21,6818857	110,147341	153,890171	14,0307809
	14	18,5287544	21,6857674	109,700744	154,574902	14,214119
	15	18,534254	21,6335199	111,795049	155,509963	14,1049254
	16	18,4928456	21,59424	111,951183	155,560854	14,0613105
	17	18,4735024	21,5702989	111,75172	156,204573	14,354464
	18	18,4374375	21,6043488	112,387317	155,947549	13,7548
	19	18,4439887	21,5625856	109,541122	155,586146	14,7646606
	20	18,400529	21,5641099	110,84428	156,36478	14,3889158
	21	18,4264594	21,6036625	109,011073	155,447451	14,6154893
	22	18,3971623	21,5506695	108,730207	154,56589	14,5348272
	23	18,3711561	21,5013462	109,530659	154,356829	14,3205905
	24	18,3684561	21,6124968	109,530659	155,52828	14,1791137

Tabella 6.2

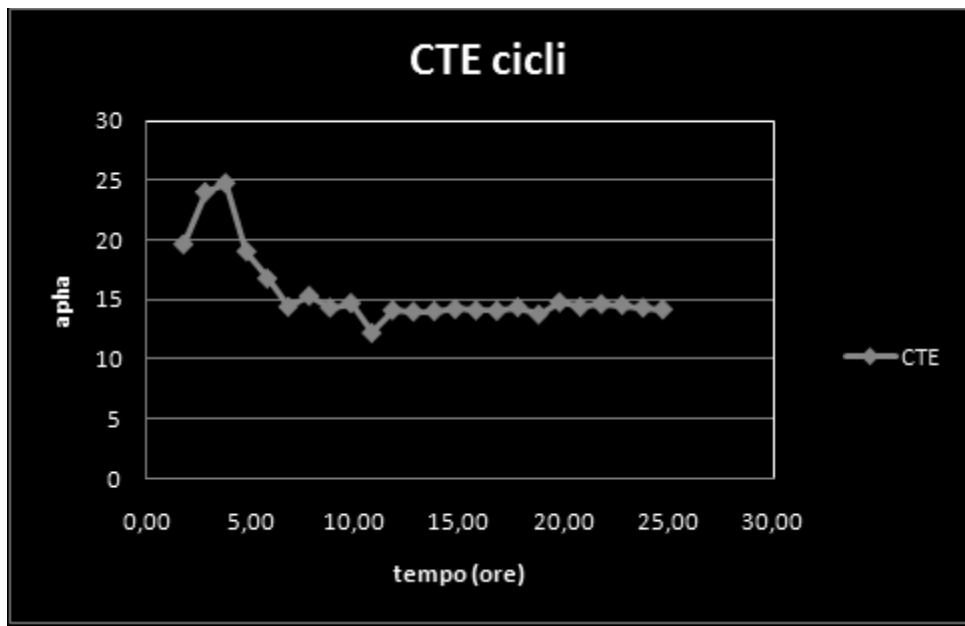


Figura 6.6

Come già precedentemente accennato l'andamento del coefficiente di dilatazione termica è discendente e si nota, con il trascorrere del tempo che il suo andamento si stabilizza, come verrà confermato anche dalle prove successive.

PROVA MC008: Ampiezza 2°C, periodo 2h, con lo stesso provino di MC006

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 26/10/2010 15:15 getto
- Inizio delle misure: 29/10/2010 16:22:00 (circa 72 ore dopo il getto)
- Condizioni di prova: prova con calcestruzzo di MC006; Tacca variabile con una sinusoide di Ampiezza 2°C e periodo 2 ore; Ambiente costante a 20°C.
- Scopo della prova: valutazione del CDT (parte della curva in cui dovrebbe essere stabile perché si è a 72 ore dal getto)

Per quanto riguarda l'andamento del CDT, è stato calcolato, con la stessa metodica utilizzata nella prova MC006, per 6 cicli in quanto si ritiene siano sufficienti per descrivere il comportamento del coefficiente arrivati a questo stadio di maturazione, si ha infatti una stabilizzazione di α intorno al valore di $11 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$, come era prevedibile, essendo passato del tempo dalla fabbricazione del calcestruzzo. Ci si trova quindi nella parte di curva costante del coefficiente di dilatazione termica.

Lunghezza provino(m)	cycle	tmin beton	tmax beton	ϵ		$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ alpha
				dmin beton	dmax beton	
0,205	1	18,046609	21,785752	-20,4191	20,8296463	11,0316
	3	18,045807	21,795909	-20,09898	23,3914878	11,59714
	5	18,068906	21,770837	-20,50312	22,3008659	11,56261
	7	18,054723	21,768288	-20,65199	22,7942683	11,69934
	9	18,037329	21,728155	-20,9346	22,4671707	11,75937
	11	18,021958	21,771412	-22,90098	20,3810122	11,54355

Tabella 8.2

Da cui il grafico:

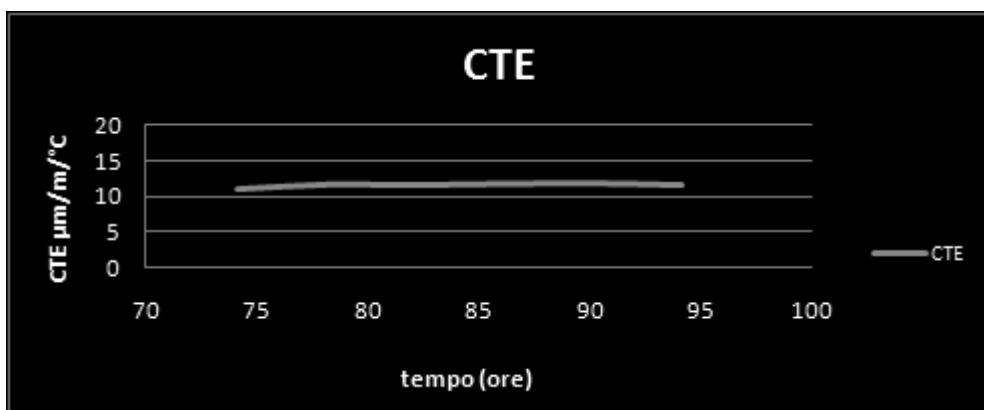


Figura 8.6

PROVA MC010

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 09/11/2010 10:19:00 getto
- Inizio delle misure: 11:16:00
- Condizioni di prova: Calcestruzzo all'interno di BTJASPE; Tacqua variabile con una sinusoide di Ampiezza 2°C e periodo 1 ora; Tambiente costante a 20°C.
- Scopo della prova: valutazione del CDT

Si è proceduto quindi alla seconda colata di calcestruzzo ordinario con caratteristiche e composizione identiche a quelle utilizzate nella prova MC006, e che sarà utilizzato per tutte le prove seguenti, comprese quelle che saranno effettuate per la caratterizzazione meccanica.

Poiché come già detto in precedenza il massimo numero di cicli con cui è possibile programmare il bagno di circolazione è 99, è stato necessario arrestare il programma e farlo ripartire, per avere così la possibilità di prolungare nel tempo le registrazioni. Inoltre, come si vedrà in seguito c'è un arco di tempo, pari a circa 44 ore, in cui l'acqua si è mantenuta costante a 20°C, periodo nel quale non c'è stata la possibilità di riavviare il programma.

In quest'arco di tempo, quindi, non si hanno delle misure di CDT.

I risultati ottenuti si sono dimostrati coerenti con quelli dedotti dalla prova MC006; per quanto riguarda invece il rigonfiamento del materiale che si era dimostrato importante nei dati ottenuti dalla prova MC006, ora sussiste sempre, ma con dimensioni ridotte. Si ottiene infatti che, nelle prime ore dopo il contatto acqua cemento, il rigonfiamento è dell'ordine di 5µm, come rappresentato nel grafico successivo.

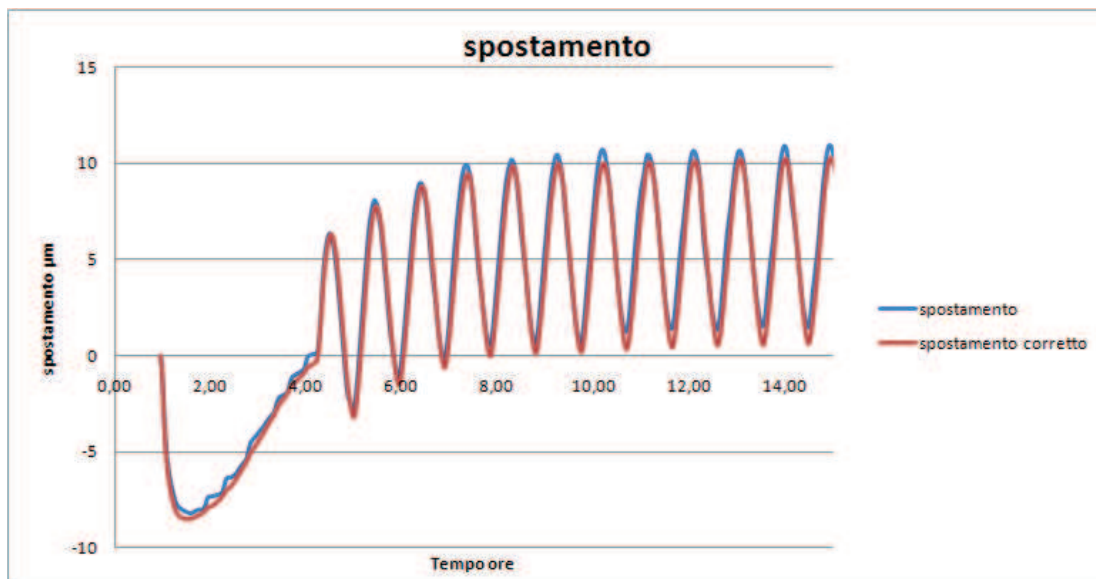


Figura 10.1

Si nota la presenza di un ritiro subito dopo l'inizio delle registrazioni. Siamo ancora nel periodo prima della presa e quindi non si può pensare a un ritiro nell'accezione comunemente utilizzata, quale ritiro endogeno o termico, ecc. quanto più ad un assestamento del materiale.

Saranno comunque effettuate successivamente delle altre prove per avere conferma di questo comportamento, anche se, come già spiegato in precedenza, si tratta di uno stato in cui il materiale non ha ancora un volume proprio e quindi delle misure lineari, cioè quelle che si fanno effettuando, non sono molto significative.

Si ricorda comunque che lo spostamento corretto è lo spostamento calcolato depurando la componente dovuta all'accorciamento delle colonne causato dalla temperatura dell'acqua e considerando quindi una sensibilità delle colonne pari a $-2,23\mu\text{m}/^\circ\text{C}$.

Si sono inoltre separate, all'interno della deformazione totale, la deformazione termica da quella endogena, ottenendo il seguente grafico:

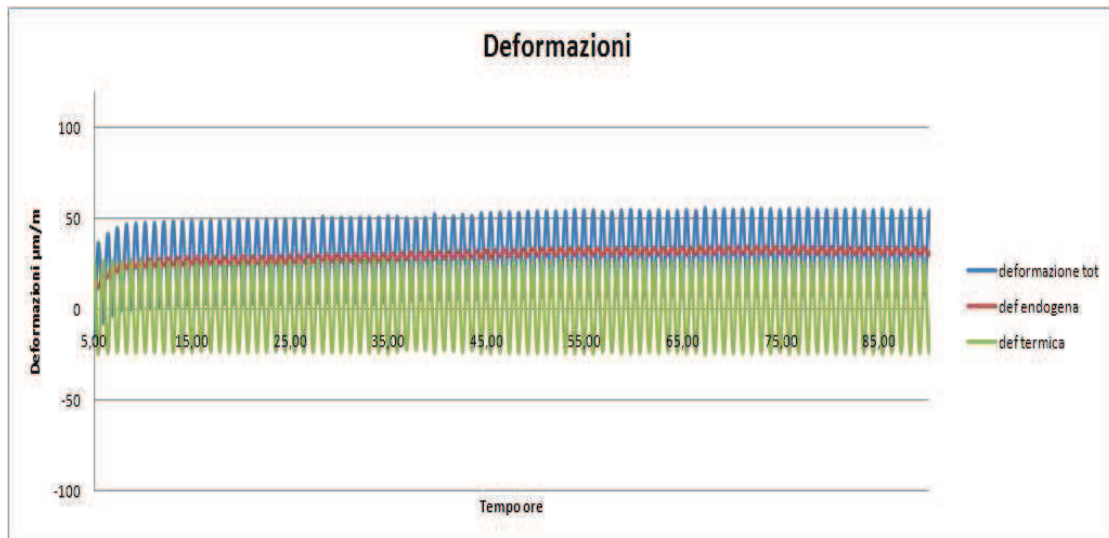


Figura 10.2

La componente di ritiro endogeno è stata calcolata a partire dall'andamento dello spostamento corretto, facendo una media sul periodo e quindi facendo in modo di annullare la deformazione termica per ottenere solo quella endogena.

Dalla differenza tra deformazione totale e deformazione endogena, si è infine ottenuta la deformazione dovuta al ritiro termico.

Come si può vedere dal grafico precedente, la componente di ritiro endogeno incide molto poco sulla componente della deformazione totale. Ciò può essere spiegato con il fatto che il calcestruzzo in questione è di tipo ordinario e che il rapporto a/c non è basso e quindi il ritiro endogeno non fornisce valori importanti.

La separazione delle componenti della deformazione è stata necessaria per il calcolo del CDT, vero scopo della prova. Si ricorda infatti che per un buon calcolo del CDT le deformazioni necessarie sono quelle dovute a gradiente di temperatura pressoché nullo.

Per calcolare il CDT si è utilizzato il parametro α , derivante dalla seguente espressione:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{T_1 - T_1}$$

come già detto in precedenza. È importante sottolineare come gli estremi considerati per i valori utilizzati siano quelli in cui il gradiente di temperatura tra cuore e pelle, è risultato, in ciascun ciclo, praticamente nullo. I valori quindi utilizzati per $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ e $T_1 - T_2$ sono quelli che identificano la differenza di temperatura tra cuore e pelle minima possibile.

È stata calcolata quindi l'evoluzione del CDT per un periodo abbastanza lungo da vederne il suo sviluppo. Con la correzione termica dello spostamento si è quindi ottenuto il seguente andamento:

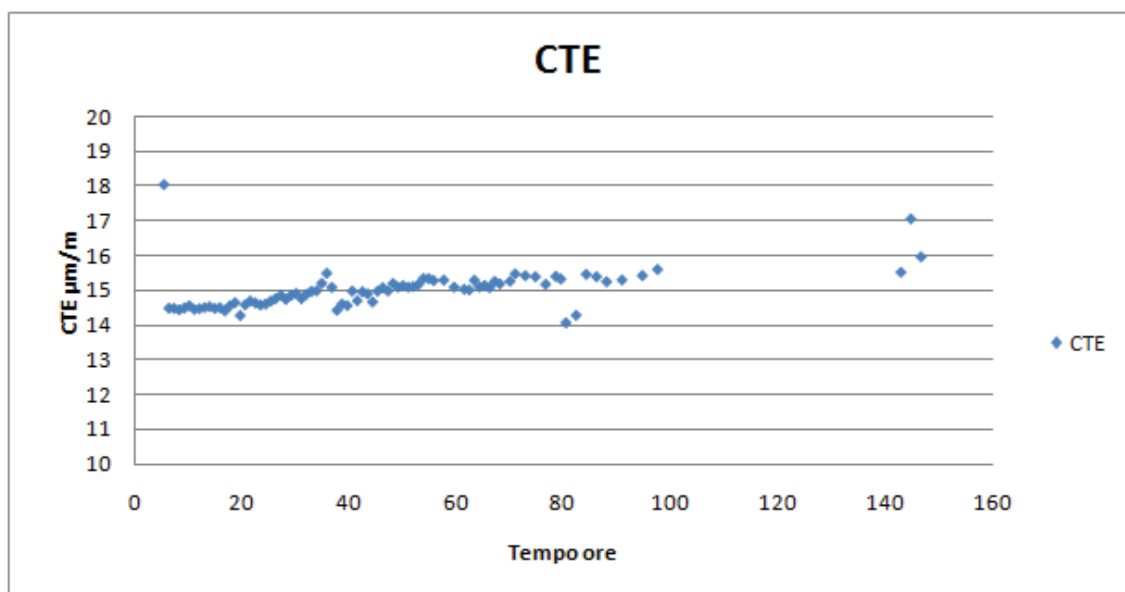


Figura 10.3

Come si può vedere dal grafico precedente, i valori ottenuti del coefficiente di dilatazione termica sono poco dispersi, anche se il valore medio ottenuto è un po' più alto di quello che ci si aspettava. Ciò può essere dovuto alla composizione del calcestruzzo in esame, visto che con un rapporto a/c elevato; inoltre il valore del CDT dipende anche dal tipo di aggregati utilizzati.

Con il passare del tempo si ha un leggero innalzamento del valore del CDT, comportamento che conferma i risultati già trovati sperimentalmente sullo studio dell'evoluzione di CDT per vari tipi di malte.

La dispersione di punti non è accentuata, e questo grazie alla correzione termica effettuata nel calcolo dello spostamento corretto.

Se non si fosse effettuata questa correzione, l'andamento del coefficiente di espansione termica sarebbe stato il seguente:

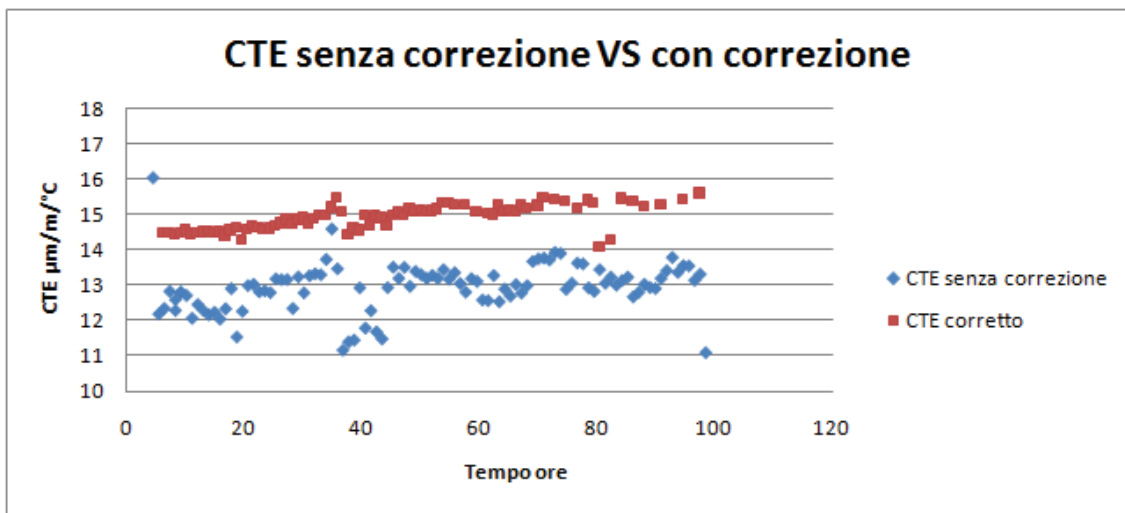


Figura 10.4

PROVA MC011

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 17/11/2010 09:50:00 (getto)
- Inizio delle misure: 10:33:00
- Condizioni di prova: Tacqua variabile con una sinusoide di Ampiezza 2°C e periodo 1 ora; Ambiente costante a 20°C.
- Scopo della prova: valutazione del CDT

Per verificare la ripetibilità dei dati ottenuti dalla prova precedente, si è ripetuta la prova mantenendo quindi inalterate le condizioni della prova MC010. Si è quindi impostata una sinusoide per la variazione di temperatura con periodo un'ora e ampiezza 2°C, e quindi la temperatura dell'acqua è stata fatta oscillare tra 18°C e 22°C.

I risultati ottenuti sono perfettamente in linea con quelli della prova MC010; in particolare il valore del CDT risultante dalle due prove è praticamente lo stesso, come riportato nel grafico:

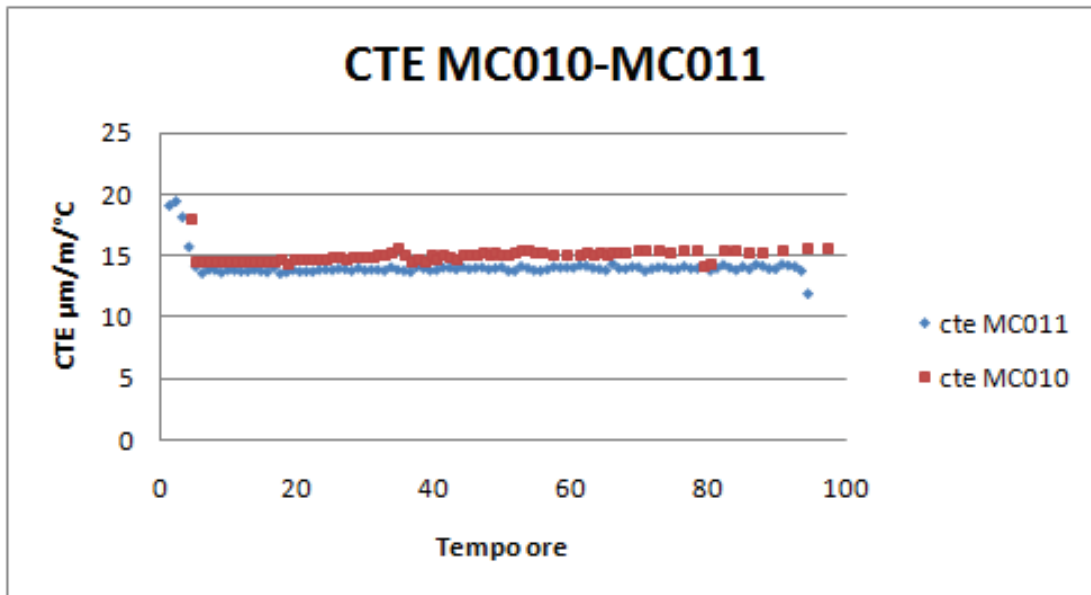


Figura 11.1

Come è possibile intuire dal grafico il valore del CDT delle due prove è circa lo stesso. Il valore del CDT resta comunque un po' elevato, circa $15\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$; ciò è probabilmente dovuto alla composizione del cemento, sia per quanto riguarda gli aggregati utilizzati sia per il rapporto a/c elevato.

PROVA MC013

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 25/11/2010 10:24:00 (getto)
- Inizio delle misure: 11:16:00
- Condizioni di prova: Tacqua variabile con una sinusoide di Ampiezza 2°C e periodo 1 ora; Tambiente costante a 20°C.
- Scopo della prova: valutazione del CDT, con il posizionamento della sonda per la misurazione della temperatura dell'acqua all'ingresso di BTJASPE (dopo aver fatto la prova MC012).

Per verificare la ripetibilità dei risultati ottenuti in MC010 e MC011, si è effettuata questa prova, avente quindi tutte le caratteristiche della prove precedenti. Nelle due prove precedenti, si ricorda, la temperatura dell'acqua era stata misurata con una sonda di platino posta direttamente nel bagno di circolazione. In questa prova, invece, si è posta la sonda all'ingresso di BTJASPE, visto che nella prova MC012 era stata rilevata una differenza di temperatura tra bagno di calore stesso e ingresso del cilindro d'acciaio. È stato possibile ricavare quindi il seguente andamento del CDT:

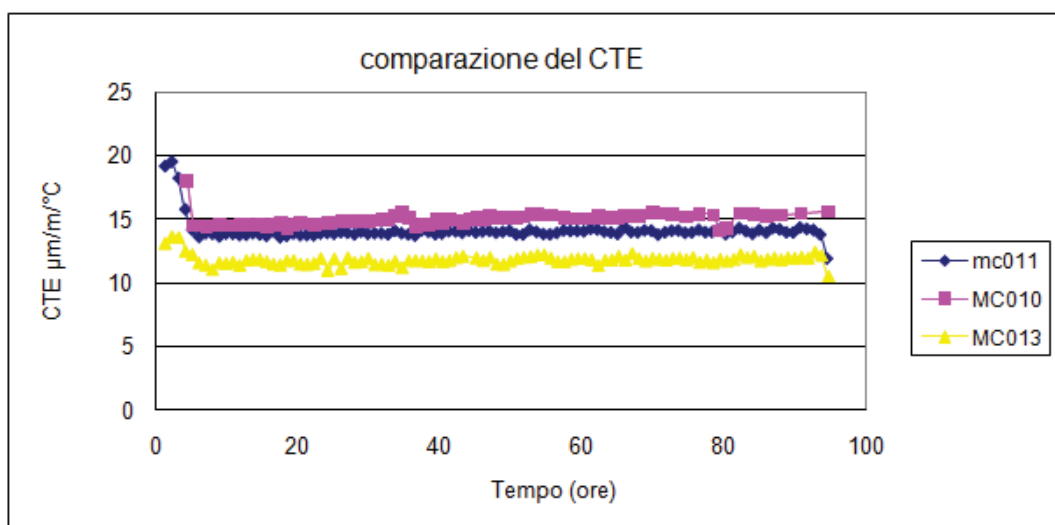


Figura 13.1

Come si vede dal grafico sopra riportato, l'andamento del CDT appare perfettamente in linea con quello delle prove precedenti. Sono stati infatti messi a confronto i risultati ottenuti per questo parametro dalle prove MC010, MC011 e MC012.

3. Caratterizzazione Meccanica del materiale

In questa parte, inerente alla caratterizzazione meccanica del materiale, verranno affrontati i problemi relativi a fluage, rilassamento, modulo di Young e Coefficiente di Poisson del materiale.

Prima di passare però all'analisi sperimentale, si ritiene utile dare delle informazioni bibliografiche inerenti a fluage e rilassamento, per meglio comprendere le ipotesi fatte sperimentalmente e quindi i risultati ottenuti.

3.1 Bibliografia

3.1.1 Fluage

La differenziazione tra fluage puro e fluage dovuto all'essiccazione del calcestruzzo, è ormai cosa nota nella comunità scientifica. Esistono infatti due meccanismi fisico-chimici completamente diversi alla base di questi due fenomeni. Il fluage d'essiccazione è comunque ottenuto dalla differenza tra il fluage totale che si ha in un provino di calcestruzzo, soggetto ad essiccazione, e il fluage puro [Granger,1996].

Nel corso di questa trattazione, si approfondirà l'aspetto legato al fluage puro, in quando il calcestruzzo qui esaminato non presenta le condizioni perché si produca il fluage per essiccazione.

In generale è possibile fare prove di fluage sia a compressione che a trazione. È anche vero però che quelle a compressione, oltre ad essere più facilmente realizzabili, forniscono dei risultati molto più utili e vicini al reale utilizzo del materiale, visto che nel campo delle costruzioni il calcestruzzo viene sollecitato a compressione.

La classica prova di fluage realizzata in laboratorio, consiste nel caricare un provino in calcestruzzo, con sforzo e temperatura costanti.

Quando si sollecita quindi il provino con un carico costante, si hanno due tipi di deformazioni: quella istantanea e quella differita, che sommate danno la deformazione totale registrata.

La prima componente è una deformazione istantanea elastica, e si ha al momento dell'applicazione del carico.

Questa deformazione è completamente reversibile nel preciso momento in cui il carico viene annullato, ed è legata all'intensità del carico applicato attraverso il modulo di Young.

La seconda componente, invece, corrisponde al fluage puro del materiale, ossia alla deformazione differita che inizia con l'applicazione del carico e si protrae per tutto il periodo in cui il carico viene mantenuto costante [Charron, 2003].

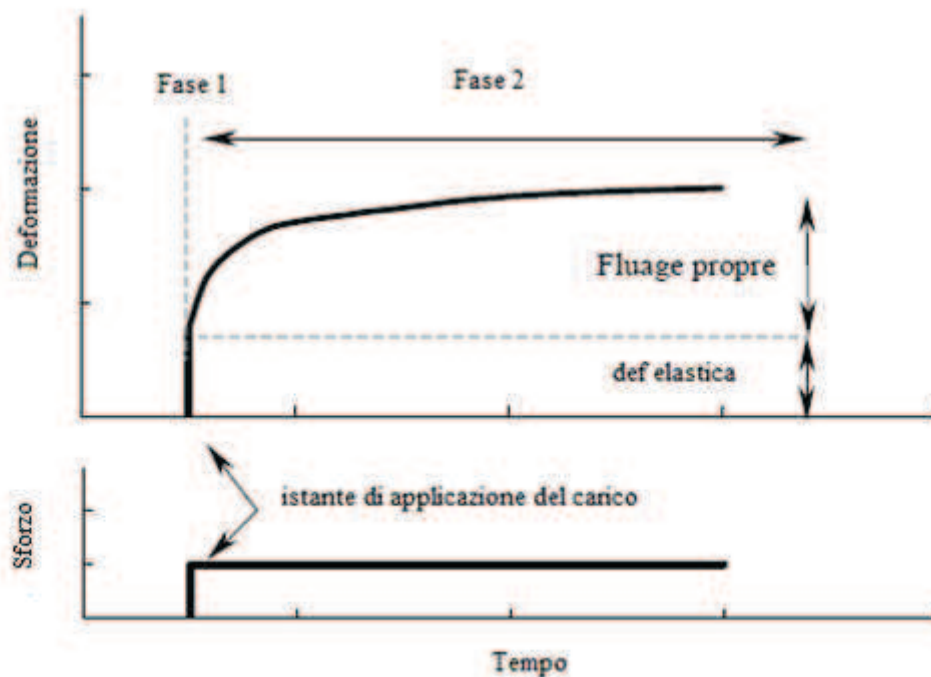


Figura 1.31

Nella figura precedente si trova una spiegazione di quanto sopra detto a riguardo del fluage.

All'origine del fluage si possono individuare due tipi di meccanismi, quelli diretti e quelli indiretti.

I meccanismi diretti sono dovuti alla pasta di cemento e sono quelli che contribuiscono maggiormente alla deformazione di fluage misurata. I meccanismi diretti a loro volta sono dati da due componenti, l'una responsabile del fluage a breve termine, l'altra di quello a lungo termine [Charron, 2003].

Si analizzano brevemente queste due componenti:

Meccanismi diretti:

1-Teoria della migrazione dell'acqua

Il comportamento della pasta idratata è quello di un gel rigido. A livello microscopico gli idrati sono assemblati uno sull'altro in modo che gli spazi interstiziali siano saturi d'acqua.

Quando la pasta di cemento viene sottoposta al carico, la parte liquida è espulsa dai pori in gel verso zone di minor pressione, quali i pori capillari.

Una parte degli sforzi quindi va a distribuirsi verso lo scheletro di idrati [Neville, 1970].

Si ha allora che il materiale presenta una deformazione differita, nel corso del mantenimento del carico. La pressione che interessa l'acqua cala nel tempo e il tasso d'espulsione dell'acqua stessa diminuisce gradualmente. Da ciò si può capire come questo fenomeno sia per il fluage a corto termine [Guenot, 1997].

Secondo [Lea et al,1946] e [Seed, 1948], l'applicazione di un carico al materiale provoca una rottura dell'equilibrio interno, nello specifico nella pressione gassosa dei pori capillari. Implicitamente quindi si ha un cambiamento della fase liquida che porterà ad un cambiamento di volume del materiale stesso.

Il fluage quindi, secondo questa teoria, non è altro che la manifestazione del nuovo equilibrio che si sta instaurando all'interno del materiale.

È importante analizzare, dopo aver visto quest'ultima interpretazione del processo che porta ad una deformazione di fluage, la fase di recupero elastico (recouvrance) del materiale.

Questo non è che la porzione reversibile della deformazione di fluage che si manifesta quando il carico costante che sollecita il materiale, è annullato. Il recupero elastico può essere interpretato come la tendenza del materiale a ristabilire l'equilibrio interno esistente prima che venisse applicato il carico.

La teoria della migrazione dell'acqua è confermata da molteplici risultati sperimentali.

Nonostante ciò, però, esistono delle osservazioni, di cui non si entra nel dettaglio, che possono portare a delle contraddizioni con questa teoria stessa. [Wittmann, 1982] e [Neville, 1970]

2-Teoria del flusso viscoso

Questa teoria si basa sul fatto che la pasta di cemento può essere assimilata ad un liquido molto viscoso; la sua viscosità è variabile nel corso del tempo, grazie al fenomeno di idratazione. Quest'ultima infatti fa sì che si creino dei legami all'interno del materiale stesso e che quindi si formi uno scheletro interno, caratterizzato da una rigidità crescente [Charron, 2003].

Per quanto riguarda questa teoria, [Thomas, 1937] è stato il primo ad affermare che il comportamento volumetrico di un calcestruzzo sottoposto a un carico, è caratterizzato dal trasferimento di carico tra due componenti principali: gli aggregati e la pasta di cemento.

Dopo ciò [Hansen, 1960] ha rielaborato questa teoria utilizzando il concetto dello spostamento dei "foglietti" di idrati della pasta di cemento.

La deformazione a lungo termine è dovuta a degli spostamenti irreversibili della parte solida, all'interno della microstruttura cementizia. I "foglietti" di idrati, infatti, lubrificati dall'acqua interstiziale, subiscono uno scorrimento relativo, quando sottoposti a carichi elevati. I movimenti di scorrimento si hanno tra gli spazi tra i "foglietti", in quanto tra questi, i legami resistenti con la struttura circostante sono più deboli.

Dopo questi spostamenti si vengono a formare quindi dei nuovi legami interni tra i "foglietti" di idrati. L'unico problema di questa teoria è che non dà spazio a spiegazioni inerenti al recupero elastico parziale della deformazione di fluage.

Meccanismi indiretti:

I meccanismi indiretti generano la porzione di deformazione per fluage relativa al carattere composito del calcestruzzo. Infatti la presenza di aggregati e la fessurazione stessa portano a delle ridistribuzioni degli sforzi nel materiale stesso.

Ciò contribuisce ad avere delle modifiche a livello volumetrico, in un materiale che è sottoposto a carico costante. Si analizzano in seguito queste due componenti:

1-La fessurazione:

Nel momento in cui si sollecita il calcestruzzo con degli sforzi importanti (70% del valore della resistenza ultima) è chiaro che si verranno a formare delle micro fessure all'interno del materiale stesso. Questa micro fessurazione a carichi elevati, porta ad un'amplificazione dei meccanismi di fluage, e quindi a volte si arriva anche alla rottura del pezzo (E' importante notare come non sia il fluage la causa della microfessurazione, ma il carico elevato. Il fluage infatti, non porterà mai alla rottura del pezzo se il carico sollecitante è troppo basso da indurre la microfessurazione) [Charron, 2003].

[Rossi et al, 1988] hanno dimostrato che la presenza di micro fessurazione dà la possibilità all'acqua dei pori capillari, di spostarsi più facilmente quando il pezzo è caricato.

L'acqua quindi andrà a fluire verso le fessure, abbandonando i pori in cui si trovava inizialmente. Il seccarsi dei pori, comparabile al fenomeno di ritiro per essiccazione, amplifica il fenomeno di fluage.

2-Gli aggregati:

Solitamente gli aggregati utilizzati per la produzione del calcestruzzo sono comparabili a occlusioni rigide, in quanto il loro fluage è nettamente trascurabile in rapporto a quello subito dalla pasta di cemento. Quest'ultima invece, si comporta come un materiale viscoso, le cui proprietà cambiano nel tempo.

Il carico applicato viene trasferito, tramite il movimento della pasta, dalla pasta stessa agli aggregati. Questi ultimi immagazzinano energia elastica durante la fase di carico [Midness et al, 1981], che verrà rilasciata quando il carico sarà azzerato; ciò spiega in parte il fenomeno del recupero elastico [Wittmann, 1982].

L'influenza degli aggregati sul fluage dipende essenzialmente dalla quantità di inerti presente nell'impasto (maggiore è la quantità e più il fluage sarà impedito) e dal loro modulo di elasticità. Quest'ultimo influenza la quantità di fluage ottenibile nel senso che più la rigidità degli aggregati è elevata e più la deformazione della pasta cementizia è impedita.

Ora che si sono descritti brevemente i meccanismi all'origine del fluage puro, si passa ad elencare qualche proprietà ricavata sperimentalmente che può essere interessante per ciò che verrà visto in seguito.

Le seguenti proprietà sono state riportate da [Granger,1996] nella sua pubblicazione:

- 1- Per una serie di sforzi inferiori al 50% della resistenza a rottura, il fluage puro è proporzionale allo sforzo stesso. Al di là del 50%, invece, alcuni autori [Bazant, 1992] hanno proposto una legge non lineare in funzione dello sforzo stesso. Come si vedrà in seguito, gli sforzi applicati nel caso studiato, sono stati scelti appositamente al 50% della curva di rottura caratterizzante il calcestruzzo ordinario utilizzato.
- 2- Un modello visco-elastico lineare fornisce, in molti casi, una buona approssimazione della deformazione in seguito a una storia di carico. La velocità di deformazione del fluage dipende dalla storia delle sollecitazioni e non solo dallo sforzo agente al momento considerato.
- 3- Un aumento della temperatura porta ad un aumento della velocità di fluage, mentre un abbassamento temperatura porta ad un rallentamento del processo. Però non si sa ancora su quale aspetto intervenga la temperatura, se sulla cinetica del fluage, sull' ampiezza della deformazione o su entrambe.
- 4- Il fluage puro è fortemente "invecchiante". Ha un valore elevato quando si carica il calcestruzzo ancora giovane, e diminuisce notevolmente con il grado di maturazione del calcestruzzo caricato (più il calcestruzzo è maturo e più il valore di fluage sarà piccolo). Per quanto riguarda i calcestruzzi maturi si può dire che si constata un "invecchiamento" netto (e quindi un valore di fluage che si riduce notevolmente), dopo circa un anno dal getto. Per il calcestruzzo giovane, invece, l'unica cosa possibile per parametrizzare l'invecchiamento del calcestruzzo è rapportarlo al grado di avanzamento della reazione di idratazione. Si rimanda alla parte sperimentale per delle considerazioni più approfondite riguardanti il fluage del calcestruzzo giovane.
- 5- La deformazione differita si prolunga per alcune decine di anni. Non esistono prove sperimentali di così lunga durata. Nonostante ciò, però, si trovano lo stesso in letteratura delle curve con asintoto orizzontale per tempi stimati infiniti.

3.1.2 Rilassamento

Con il termine rilassamento si indica il fenomeno del calo di tensione, proporzionale alla deformazione, che si ha in un materiale quando la sua libera deformazione è impedita. Nelle prove che si effettuano in laboratorio si impone solitamente una lunghezza (deformazione costante) e si vanno a registrare le variazioni degli sforzi.

In letteratura non si trova molto materiale su questo fenomeno, in quanto si preferisce realizzare prove sperimentali sul fluage per trarre delle conclusioni anche sul rilassamento.

Come si vedrà in seguito, infatti, i due fenomeni risultano indissolubilmente legati.

Si può anche leggere il rilassamento come una sorta di fluage sotto carico decrescente, tale da mantenere la deformazione costante.

[Bissounette, 1996] ha comunque realizzato una prova di rilassamento a trazione su calcestruzzi ordinari. I provini sono stati caricati a 1.51Mpa a 7 giorni e la prova ha avuto una durata di 98 giorni. Il rilassamento è risultato davvero pronunciato. Dopo tre giorni il livello degli sforzi era sceso del 50% rispetto a quello iniziale e alla fine della prova si era arrivati a 0.2MPa, pari al 13% del carico iniziale.

Si può intuire anche qui il comportamento “invecchiante” del rilassamento, come visto nel fluage: la perdita di tensione è inversamente proporzionale al grado di maturazione del provino.

Un grafico di monitoraggio del rilassamento si presenta, in generale, come segue:

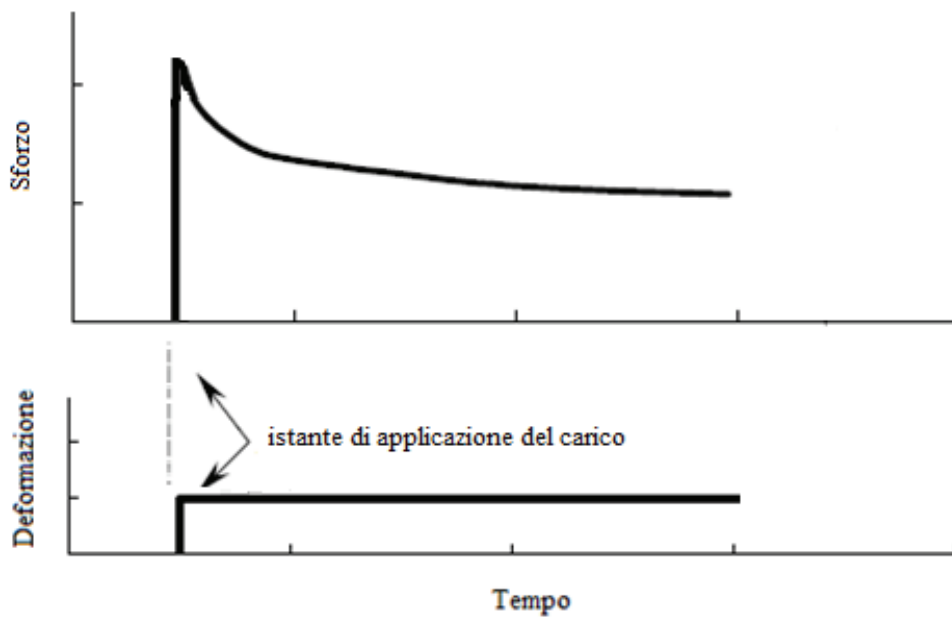


Figura 1.32

Si ritiene che il fluage e il rilassamento siano due fenomeni di notevole importanza in quanto fondamentali per la corretta stima del rischio di fessurazione del calcestruzzo giovane.

Ci si trova ad esempio di fronte a rischio di una cattiva stima quando si opera con riparazioni o riprese di getto.

Il meccanismo di fessurazione è il seguente.

Il calcestruzzo fresco è colato sul calcestruzzo già maturo e che dunque ha già subito fenomeni di deformazione iniziale e quindi al momento del secondo getto sono più deboli. Il calcestruzzo appena colato sarà soggetto a ritiro che sarà impedito dal calcestruzzo maturo sottostante. Il calcestruzzo maturo si trova quindi sottoposto a sforzi di compressione. In contrapposizione alla tendenza ad accorciarsi del calcestruzzo giovane, si verranno quindi a formare delle tensioni di trazione nel calcestruzzo giovane.

È possibile tracciare una curva che descrive lo sviluppo nel tempo di questi sforzi di trazione; questa andrà comparata con la curva dell'evoluzione della resistenza a trazione del calcestruzzo in questione. Nel momento in cui le due curve si intersecheranno, e quindi sarà raggiunta la resistenza in trazione del materiale, si avrà la comparsa della fessura.

Le tensioni che si sviluppano nel pezzo sono la premessa all'instaurarsi (all'origine) del fenomeno di fluage, o meglio in questo caso di rilassamento. Nel caso in esame infatti, si ha una lunghezza imposta al pezzo di calcestruzzo, e quindi una deformazione impedita, e si assiste ad una diminuzione delle tensione nel tempo.

Quindi la presa in conto di fluage e rilassamento permette di diminuire lo sforzo agente e quindi abbassare la curva dello sviluppo degli sforzi relativa al calcestruzzo e quindi di abbassare il rischio di fessurazione.

La non presa in conto del fenomeno di fluage e rigonfiamento implica praticamente una sovrastima degli sforzi presenti nel pezzo, e quindi della fessurazione.

Si è scelto in questa parte della trattazione di fornire dapprima delle spiegazioni riguardanti le modalità di svolgimento e di acquisizione delle prove, per poi illustrare i modelli utilizzati per fornire un riscontro analitico ai risultati trovati.

3.2 Parte sperimentale

Come è già stato brevemente accennato nell'introduzione, l'obiettivo della caratterizzazione meccanica del materiale è quello di studiare fluage e rilassamento (il modulo di elasticità e le coefficiente di Poisson saranno trattati in seguito).

Per poter quindi dare un'interpretazione ai risultati che si sono trovati con l'esecuzione delle prove meccaniche, si è cercato un modello reologico che potesse descrivere con precisione il comportamento di un materiale visco-elastico, come quello supposto per il calcestruzzo. Il calcestruzzo è un materiale che evolve, finché la reazione di idratazione non si esaurisce; è quindi considerato "invecchiante".

Il calcestruzzo maturo (l'idratazione è terminata), è un materiale che è soggetto a fluage; un calcestruzzo giovane, invece, è soggetto ad entrambi i fenomeni: fluage ed invecchiamento.

Sperimentalmente, il provino di calcestruzzo sarà soggetto a carichi di fluage o rilassamento di corta durata (5min) tra i quali si avranno momenti a carico nullo. Questi carichi sono effettuati ad intervalli regolari. (30 min). Questo tipo di sollecitazioni devono permettere di mettere in evidenza la suscettibilità del materiale al fluage in funzione della sua caratteristica di essere invecchiante. Il modello reologico ricercato è ipotizzato essere in grado di descrivere il fluage a corta durata.

Prima di passare alla modellizzazione vera e propria, si riporta una descrizione della strumentazione utilizzata.

3.2.1 Strumenti utilizzati

Oltre agli strumenti già descritti nella parte inerente alla caratterizzazione termica del provino, si riporta ora una breve descrizione della pressa, macchinario indispensabile per la caratterizzazione meccanica del materiale.

La pressa

Per svolgere quindi la caratterizzazione meccanica del calcestruzzo in questione, si utilizza un macchinario comunemente denominato “pressa”. È un macchinario dotato di un martinetto idraulico alla base, con servovalvola.

La pressa è dotata di due colonne e due traverse; alla traversa superiore è annesso un captore di sforzo. La traversa inferiore, invece, ospita il martinetto, la cui capacità massima è di 500KN.

BTJASPE, già descritto nella parte inerente alle prove termiche, in questo caso è fissato al pistone del martinetto, ma non direttamente.

C'è un appoggio intermedio in cui è in circolazione dell'acqua, che ha lo scopo di impedire il surriscaldamento di BTJASPE, a causa del calore proveniente dalla pompa e dal gruppo idraulico che alimentano la pressa.

Per il funzionamento di questa prova sono stati dunque necessari due bagni termostatici, l'uno per rifornire d'acqua la cavità superiore, l'altro per quella inferiore.

Sono stati posti sulla pressa dei blocchi isolanti in polistirene espanso, per rendere BTJASPE insensibile all'irraggiamento di calore proveniente dalla traversa inferiore e dalle colonne, e ciò con lo scopo di minimizzare l'influenza della temperatura esterna sulla prova.

Sotto il captore di sforzo è posizionato quindi un cono, che, come precedentemente visto nella descrizione di BTJASPE, ha la funzione di trasferire il carico dalla pressa al macchinario stesso. Nel cono è posto un captore di spostamento necessario per un approccio non istantaneo ma graduale, e quindi un'imposizione di carico controllata; in

pratica il captore dà sensibilità al cono superiore. Questo LVDT ha una corsa massima di 5mm, 2,5 in trazione e 2,5 in compressione.

Nello schema seguente è rappresentato schematicamente il funzionamento del “circuito” per il rilevamento dei dati che si ricavano dalla pressa.

Tutto inizia con l’emissione di un segnale da parte de Generatore di consegna. Questo segnale è detto segnale Pilota. È sempre rapportato al segnale Pilotato, di cui poi si spiegherà l’origine. La differenza tra i due segnali, detta segnale d’errore (ϵ), è praticamente sempre nulla. Il segnale ϵ quindi viene trasmesso quindi al circuito correttore, detto PID, che significa azione “Proporzionale Integrale e Derivata”. Queste tre azioni, infatti, sono combinate prima che il segnali lasci il circuito PID, sotto forma di un unico segnale, che andrà all’amplificatore di corrente, in grado di fornire una potenza sufficiente alla servo valvola (sempre con un’escursione di tensione compresa tra $\pm 10V$).

Si può decidere quindi, di lavorare con la pressa a Forza o Spostamento imposti oppure utilizzando un parametro esterno, che spesso viene scelto come la variazione di lunghezza del provino.

È ricorrente usare come parametro su cui lavorare il parametro esterno, visto che ad esempio lavorare a spostamento imposto implica tenere in conto gli spostamenti non solo del provino, ma anche quelli del macchinario stesso.

Questi tre parametri arrivano a un selezionatore, che ne sceglie uno, che sarà il segnale pilotato, che verrà quindi confrontato con il segnale pilota e quindi tarato così da avere un ϵ praticamente sempre nullo.

Il circuito quindi si è chiuso.

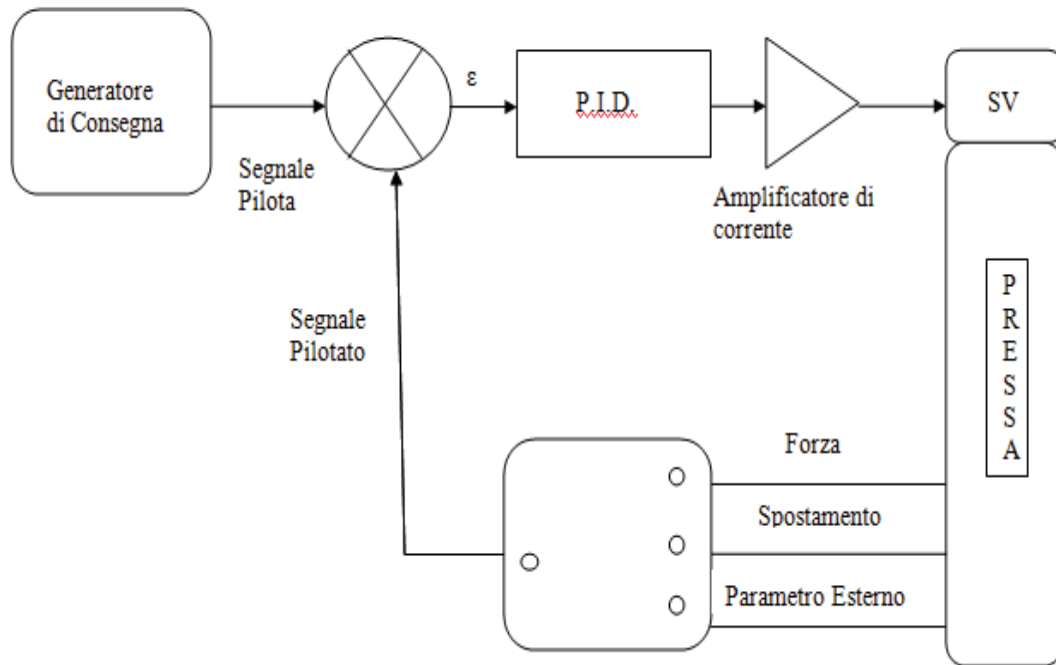


Figura 1.33

Estensimetro J2P

Si tratta di un estensimetro di marca J2P, dotato di 3 captori per le misure di spostamento longitudinale e tre captori per le deformazioni trasversali [Boulay e al,1979].

L'estensimetro stesso si compone in due anelli in lega d'alluminio che supportano i captori trasversali e longitudinale.

Ogni anello è fissato al provino grazie a 3 puntoni guidabili, in direzione radiale, con delle lamelle in acciaio.

Questo tipo di guida:

- Assicura un posizionamento corretto e all'interno del gioco stesso in direzione longitudinale
- Non induce ad alcuno sforzo nella corona, che può essere utilizzata come base di misura di spostamenti micrometrici tanto nell'asse del provino che radialmente

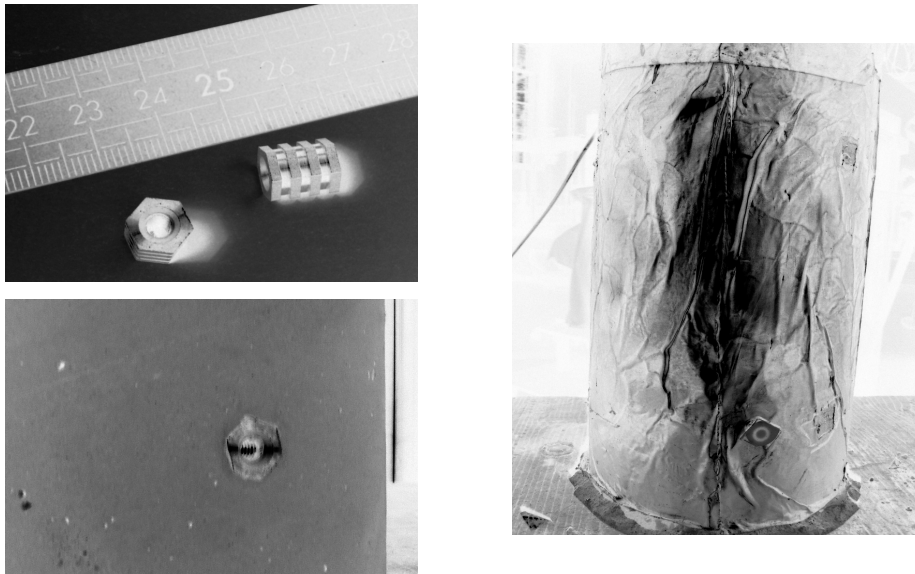


Figura 1.34

Tre piccole placche in vetro, incollate su delle viti, avvitate esse stesse in degli inserti inseriti nel calcestruzzo al momento del getto (Figura 1.34), forniscono una superficie liscia su cui alloggiare le estremità dei captori trasversali di spostamento, fissati sulla corona inferiore dell'estensimetro.

Durante la prova sul provino gettato e tolto dalla forma cilindrica in cartone subito dopo la presa, tutta l'apparecchiatura è posizionata sull'appoggio raffreddato dalla circolazione dell'acqua, di cui si è parlato prima.

L'estensimetro è stato dotato di una sonda in platino che consente di monitorarne la temperatura per tutta la durata della prova. Inoltre all'interno del provino è annegata una termocoppia per il monitoraggio della temperatura del calcestruzzo stesso.

Si riporta in seguito un'immagine dell'Estensimetro utilizzato e posizionato sul provino di calcestruzzo.

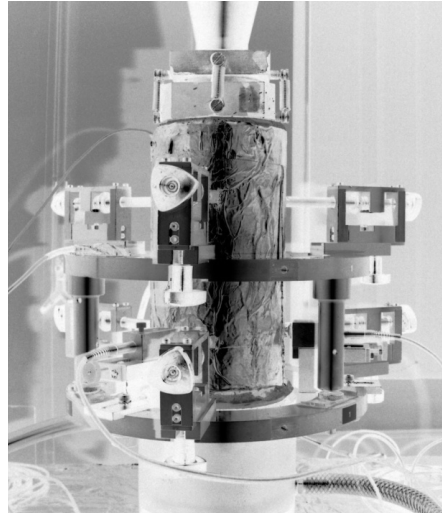


Figura 1.35

Calorimetro

Un calorimetro QAB è un cassone in plastica al centro del quale è posto un provino di diametro 16 cm e di altezza 32 cm. Lo spazio tra il provino e le pareti esterne del cassone è riempito di materiale isolante (poliuretano). Lo spessore di isolante è praticamente costante in tutte le direzioni, compreso al di sopra del provino e sul coperchio stesso (figura 1.35).

Una PT100 attraversa il coperchio (in condizioni ermetiche, isolate) e cade in un tubo di rame, che è riempito di olio per far sì che sia assicurata una buona trasmissione termica. Questo tubo è posizionato al centro del provino, tramite un foro presente sul coperchio del cilindro in cartone, in cui è gettato il provino.

3.2.2 Prova calorimetrica (QAB) ed Espressione dei risultati in funzione del grado di idratazione

Si ritiene di fondamentale importanza poter esprimere i risultati che si andranno a ricavare, in funzione del grado di idratazione del calcestruzzo, in quanto quest'ultimo è indipendente dalla storia di temperatura del materiale.

Si definisce quindi come grado di idratazione $\xi(t)$, al tempo t , il rapporto tra la quantità di cemento che ha già reagito e la quantità di cemento iniziale.

Se l'idratazione è totale, si ha che il rapporto vale 1; in generale ciò non accade mai nel calcestruzzo.

Il valore puntuale e l'andamento generale del grado di idratazione sono trovabili sperimentalmente sia per mezzo di metodi diretti sia realizzando il grado di avanzamento di un parametro fisico-chimico (del calore rilasciato nel nostro caso) legato al grado di idratazione, come si vedrà in seguito.

Si introduce inoltre il concetto di tempo equivalente, t_{eq} , che permette di trovare una relazione tra una maturazione a temperatura costante e il grado di idratazione.

Il tempo equivalente designa quindi quella scala temporale che si può definire assumendo che la temperatura del provino resti, durante tutta la sua vita, costante; qui questa temperatura sarà supposta pari a 20°C.

In pratica si tratta di passare da una scala temporale reale per la quale la storia di temperatura e gli altri parametri registrati evolvono in modo qualsiasi, a una scala di tempo in cui si ha una maturazione del calcestruzzo a temperatura costante. In altre parole un parametro avente valore a all'istante t , presenta lo stesso valore a ma all'istante equivalente t_{eq} , diverso da t .

Riprendendo il concetto fondamentale già riportato precedentemente, allora, se si riuscisse a conoscere sperimentalmente l'evoluzione del grado di idratazione ξ in funzione del tempo equivalente a 20°C (t_{eq}), sarebbe possibile esprimere i risultati in funzione del grado di idratazione e non solo in funzione del tempo reale della prova. Ciò è quello che ci si propone di fare grazie alla prova calorimetrica.

Si utilizzerà, come vedremo, a questo una funzione matematica $\xi(t_{eq})$, che permette di passare dal tempo equivalente al grado di idratazione.

La curva sperimentale che mette in relazione teq e ξ , è ottenuta, per esempio, per mezzo di un calorimetro semi adiabatico per calcestruzzo (calorimetro QAB, [Boulay 2011]).

La prova in questione si basa su due concetti di base:

- L'energia liberata durante la prova (Joule), dal calcestruzzo, è proporzionale alla quantità di idrati formati
- Il grado di idratazione nel calcestruzzo non arriva mai ad essere pari a 1, nemmeno a tempo infinito. Esistono infatti alcuni anidri che non vengono idratati. Ad un certo punto quindi la reazione di idratazione cesserà.

Il calorimetro permette quindi di calcolare la curva di rilascio di calore $q(t)$, dopo il getto, effettuando delle misure di evoluzione di temperatura al cuore di un provino ATTIVO in calcestruzzo (T_{att}) e al cuore un provino INATTIVO (T_{inatt}), la cui temperatura segue le variazioni di quella ambiente, ma con un tempo di ritardo (costante di tempo), enorme, di circa 50 ore.

I due provini sono posti in due calorimetri identici.

Si andrà quindi a misurare la differenza di temperatura (θ) tra il provino attivo e inattivo, attraverso una PT100 posta tra i due cassoni.



Figura 1.36

Sono noti quindi il coefficiente di dispersione termica del calorimetro, la capacità calorifica del calorimetro stesso e del provino in calcestruzzo.

Per il calcestruzzo in questione, le misure di temperatura e la curva di rilascio di calore sono ottenuti per un provino di 16cm di diametro e 32 cm di altezza

Grazie al protocollo della prova, è possibile ricavare i due grafici successivi:

Nel primo grafico (Figura 1.37), è rappresentato l'andamento della differenza di temperatura (θ) tra provino attivo e inattivo. È importante notare come la differenza arrivi ad un massimo di 20°C, il che implica un picco di temperatura reale raggiunto dal provino attivo, pari a 40°C, visto che la prova è stata effettuata a 20°C. Inoltre, durante la terza settimana (420h), si ha che la differenza θ diventa nulla: non si ha più produzione di calore.

L'energia liberata durante la reazione di idratazione, è ridistribuita con effetto di :

- aumentare la temperatura del provino
- aumentare la temperatura del calorimetro
- essere evacuata attraverso le pareti del calorimetro, verso l'esterno

Contabilizzando il numero di Joule prodotti si ottiene la curva di rilascio di calore, che è riportata nel secondo grafico (Figura 1.38). Come si vede nel grafico, in corrispondenza a 3 settimane, si ha che il numero di Joule è costante (circa 700 KJoule). Infatti a 3 settimane, come già visto nel primo grafico, si è ipotizzato che tutti gli anidri sono idratati possibile e non si ha più produzione di calore (o almeno non è più registrabile).

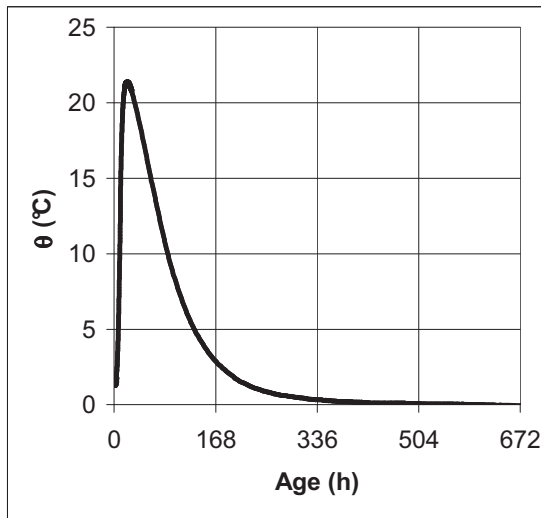


Figura 1.37

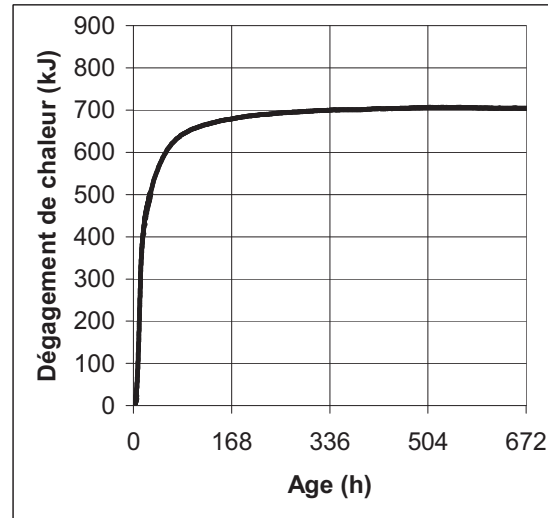


Figura 1.38

Dividendo ciascun punto della curva di rilascio di calore per i KJoule che si hanno a tempo infinito (nel nostro caso 703KJoule) è possibile calcolare il parametro detto grado di avanzamento $\gamma(t)$ all'istante t:

$$\gamma(t) = \frac{q(t)}{q_{\infty}}$$

Dove $q(t)$ è il calore rilasciato all'istante t e q_{∞} il calore totale rilasciato per un tempo infinito.

Per quanto riguarda invece, il grado di idratazione $\xi(t)$ si ricorda che questo non raggiungerà necessariamente il valore 1 quando il processo di idratazione termina, ma un valore detto $\xi(\infty)$.

Sono presenti in letteratura dei modelli per stimare questo valore; per esempio [Waller, 2000], propone, dopo l'analisi di risultati provenienti sia dalla letteratura che da suoi lavori, un'espressione adatta a cementi di tipo CEMI, come quello del caso in esame, che è funzione del rapporto a/c:

$$\xi_{\infty}^e = 1 - \exp\left(-3,3 \frac{a}{c}\right)$$

e nel caso in esame, essendo il rapporto a/c pari a 0,54, risulta $\xi_{\infty}^e=0,83$.

Tra grado di idratazione e grado di avanzamento sussiste la seguente relazione:

$$\frac{\xi(t)}{\xi_{\infty}} = \frac{q(t)}{q_{\infty}}$$

da cui :

$$\xi(t) = \gamma(t) \xi_{\infty} \quad \text{con} \quad \gamma(t) = \frac{q(t)}{q_{\infty}}$$

Dalla precedente relazione, quindi, si può trovare il grado di idratazione per ciascun istante temporale t.

Una buona stima del valore finale q_{∞} di $q(t)$ può essere ottenuto se la prova semi adiabatica è prolungata per un tempo sufficiente [Boulay et al., 2010].

In generale però ci si trova a lavorare con dei dispositivi (nel nostro caso BTJASPE) che permettono, nonostante avvenga la reazione di idratazione, che la temperatura della prova sia costante e a 20°C (il calore della reazione di idratazione è annullato dalla circolazione dell'acqua).

Se così fosse, infatti la curva di dispersione di calore sarebbe stata differente da quella che si è registrata a temperatura variabile.

In quest'ultimo caso, infatti, poiché l'idratazione del cemento è una reazione termo attiva, la cinetica sarà più rapida. A temperatura costante, invece, le reazioni si producono ugualmente, ma la cinetica è più lenta.

Lo scopo quindi è di creare un legame tra ciò che si è registrato nella prova calorimetrica (a temperatura del calcestruzzo non controllata) e ciò che accadrebbe se la temperatura del calcestruzzo fosse sempre mantenuta costante.

È per ciò che viene utilizzato il concetto di tempo equivalente (teq).

Bisogna ora ricavare un'espressione di questo grado di idratazione in funzione del tempo equivalente [Bresson, 1982], [Hansen, 1977].

Quest'ultimo può anche essere interpretato come il tempo della reazione in condizioni isoterme.

È dato dall'espressione:

$$t_{eq} = \int_{u=0}^{u=t} \exp \left\{ \frac{E_a}{R} \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T_{att}(t)} \right] \right\} du$$

In cui E_a (J mole⁻¹) è l'energia di attivazione della reazione stessa; è l'energia da fornire perché la reazione si possa produrre.

R la costante dei gas perfetti (8,314 J mole⁻¹K⁻¹).

L'espressione del tempo equivalente è funzione della storia di temperatura, come testimonia il parametro relativo alla temperatura del provino attivo ($T_{att}(t)$).

Poiché questa temperatura deve essere espressa in gradi K e nel nostro caso si vuole calcolare il t_{eq} relativo a 20°C, per l'omogeneizzazione nell'espressione compaiono i valori 293K pari a 20°C e 273K pari allo zero assoluto per portare la temperatura del provino attivo dai °C al K.

Per la determinazione quindi di t_{eq} si cerca il rapporto E_a/R , che per il calcestruzzo è stimato essere compreso tra 3000K e 8000 K.

Questo rapporto è determinato realizzando due prove calorimetriche, con storie di temperatura differenti. Per il calcestruzzo in questione, sono state quindi realizzate due prove di dispersione di calore con calorimetri QAB.

Le temperature iniziali di ogni prova sono rispettivamente 21,9°C e 10,7°C.

Dopo aver quindi realizzato le prove, i dati sono stati trattati considerando un rapporto E_a/R comune per calcolare il tempo equivalente.

Le curve di dispersione di calore non arrivano a sovrapporsi per un'energia di attivazione qualsiasi; ma facendone variare il valore si arriva a sovrapporle (figura 1.39). Si è quindi trovata la corretta energia di attivazione per il calcolo del tempo equivalente.

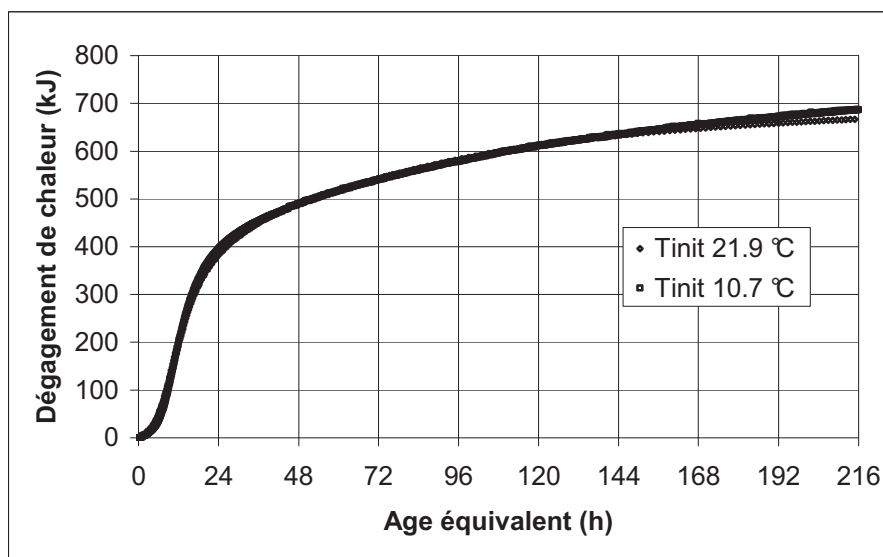


Figura 1.39

Per questo calcestruzzo, il principio di sovrapposizione utilizzato permette di ottenere un rapporto E_a/R pari a 3800K. La sovrapposizione si dimostra molto buona in un intervallo compreso tra 0 e 192 ore in tempo equivalente ($0 < \xi < 0,72$).

La relazione sperimentale tra tempo equivalente a temperatura costante (20°C) e il grado di idratazione, basata sulla prova con i calorimetri a 20,7°C, è illustrata nel grafico successivo.

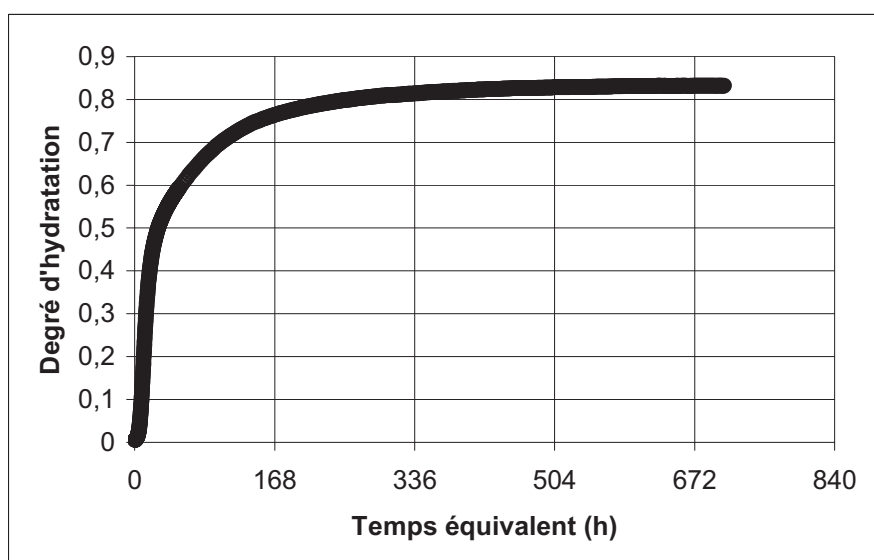


Figura 1.40

Per esprimere in modo semplificato, i differenti risultati ottenuti sperimentalmente con BTJASPE, in funzione della maturità, bisogna disporre di una relazione tra il tempo equivalente 20°C (la temperatura imposta al provino BTJASPE) e il grado di idratazione.

A tal scopo si utilizza quindi una funzione matematica interpolatrice. Affinché l'interpolazione sia precisa per un calcestruzzo molto giovane, si sceglie di utilizzare una somma di 3 funzioni sigmoidee. Una di queste curve sigmoidi è la tangente iperbolica.

Si può facilmente regolare la sua ampiezza A_i , la sua posizione sull'asse x (t_{eq0i}) e sull'asse y (+1) oltre alla pendenza della parte centrale (s_i). Gli indici vanno da 1 a 3.

Si utilizza quindi la seguente funzione, di forma:

$$\xi(t_{eq}) = k_s \left\{ \sum [A_i \tanh((t_{eq} - t_{eq0i})s_i + 1)] - \xi_0 \right\}$$

ξ_0 et k_s sono dei parametri per affinare la messa in scala della funzione.

I parametri A_i , t_{eq0i} , s_i , ξ_0 e k_s sono calcolati ed affinati con il metodo dei minimi quadrati.

Il modello ottenuto è perfettamente in grado di interpolare i punti sperimentalmente. Il modello è quindi rappresentato in figura 1.38, e risulta indistinguibile dai punti sperimentalmente (sintomo della bontà del modello).

Si sono quindi ottenuti i seguenti parametri:

		i=1	i=2	i=3
A_i	Ampiezza i	0,4921	0,9662	0,2136
$t_{eq 0i}$	sfasamento temporale i(h)	12,0889	-5,8501	122,4615
s_i	Pendenza i (h^{-1})	0,1713	0,0136	0,0052
ξ_0	sfasamento secondo l'asse y			0,58
k_s	Ampiezza globale			0,76

Tabella 1.5

3.2.4 Prova di Fluage MC014

MC014: Prove di fluage ripetute in compressione e modellizzazione

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 6/12/2010 10:20 (getto)
- Inizio delle misure: 11:26:00 (durata 48 ore)
- Condizioni di prova: Tacqua costante a 20°C; Tambiente costante a 20°C.
- Scopo della prova: studio del comportamento del calcestruzzo giovane a fluage

In questa prova si esplora la possibilità di realizzare una caratterizzazione del fluage di un calcestruzzo giovane, con BTJASPE.

Dopo una prima prova [Boulay, 2010] realizzata con:

- Periodo di 10 minuti
- Una sollecitazione a deformazione impressa e pari a $75\mu\text{def}$
- Una durata di carico mantenuta per 1 minuto
- Lo scarico

È stato constatato che il fluage registrato era troppo debole (piccolo). Per questo è stato quindi scelto di allungare la durata di fluage e aumentare la deformazione elastica iniziale. In più il numero di carichi era troppo importante (144 al giorno) e quindi è stato ridotto a 48 per giorno.

Il carico di fluage è applicato per 5 minuti ogni 30 minuti. Più precisamente ancora questo chargement è costituito dall'applicazione di uno spostamento (lo stesso per ogni ciclo) seguito da una fase di mantenimento di carico.

Lo sforzo, cioè, cambia finché raggiungo uno spostamento di $70\ \mu\text{m}$, come spiegato in seguito.

La forza corrispondente è quindi mantenuta costante per 5 minuti, durante i quali si registra la variazione delle deformazioni.

Ogni 30 minuti quindi, si è ripetuto lo stesso ciclo:

- Un palier a carico nullo
- Una deformazione imposta
- Un intervallo di carico costante di durata 5 minuti corrispondente a questa deformazione (essendo il carico raggiunto un funzione del modulo di elasticità all'istante t), in cui si registra la variazione delle deformazioni
- Un ritorno a carico nullo

Il provino è in condizioni protette dalla dessicazione e a temperatura costante. Si suppone che, durante tutta la durata della prova, il fluage sia proporzionale allo sforzo. In altre parole a un tempo considerato, il fluage specifico (rapporto tra deformazione di fluage e sforzo costante applicato) è costante.

Si suppone, per questo primo approccio, che l'istante di applicazione della sollecitazione di fluage è l'istante in cui il carico raggiunge l'inizio dell'intervallo in cui si mantiene costante.

La fase in cui si ha un incremento del carico per raggiungere la deformazione fissata, si ipotizza essere istantanea (ipotesi forte).

Il rilevamento dei dati durante la prova è stato reso possibile grazie al programma TEST STAR II, programma di configurazione della pressa, che ne governa tutte le azioni. BTJASPE oltre ai collegamenti con il bagno di calore, è stato anche dotato di 3 captori per la registrazione degli spostamenti del calcestruzzo stesso, proprio come si era effettuato durante la caratterizzazione termica del provino. Una sonda di platino è stata inoltre posta su una delle tre colonne per monitorarne la variazione di temperatura.

Nelle prove che seguiranno sono stati rilevati dei parametri quali la media dello spostamento del calcestruzzo, temperatura colonne, spostamento del captore di contatto e la temperatura al cuore del calcestruzzo.

TESTWARE SX è un programma di controllo dei comandi che permette di l'applicazione di sollecitazioni e l'automatizzazione delle misure. La sequenza eseguita con TESTWARE SX per applicare un ciclo di carico è descritta in seguito.

Questo ciclo ha un'architettura standard (che si ripete ad ogni ciclo); ciò che verrà invece di volta in volta modificato secondo necessità, saranno le durate di ogni sottofase del ciclo.

Step seguiti in un ciclo:

- 1- Verin repos: tratto costante a sforzo nullo e a spostamento nullo
- 2- Acquisition repos: dati registrati durante la fase Verin repos
- 3- Approche contact: contatto tra LVDT contatto e parte superiore di BTJASPE
- 4- Acquisition charge: dati registrati durante la fase
- 5- Chargement: inizio della fase di carico
- 6- Maintien charge: fase a carico costante
- 7- Acquisition maintien: dati registrati durante la fase Maintien charge
- 8- Retour verin: fase di ritorno; non c'è più contatto tra elementi
- 9- Acquisition retour: dati registrati durante la fase Retour verin
- 10- Etape effectuée: fine del ciclo

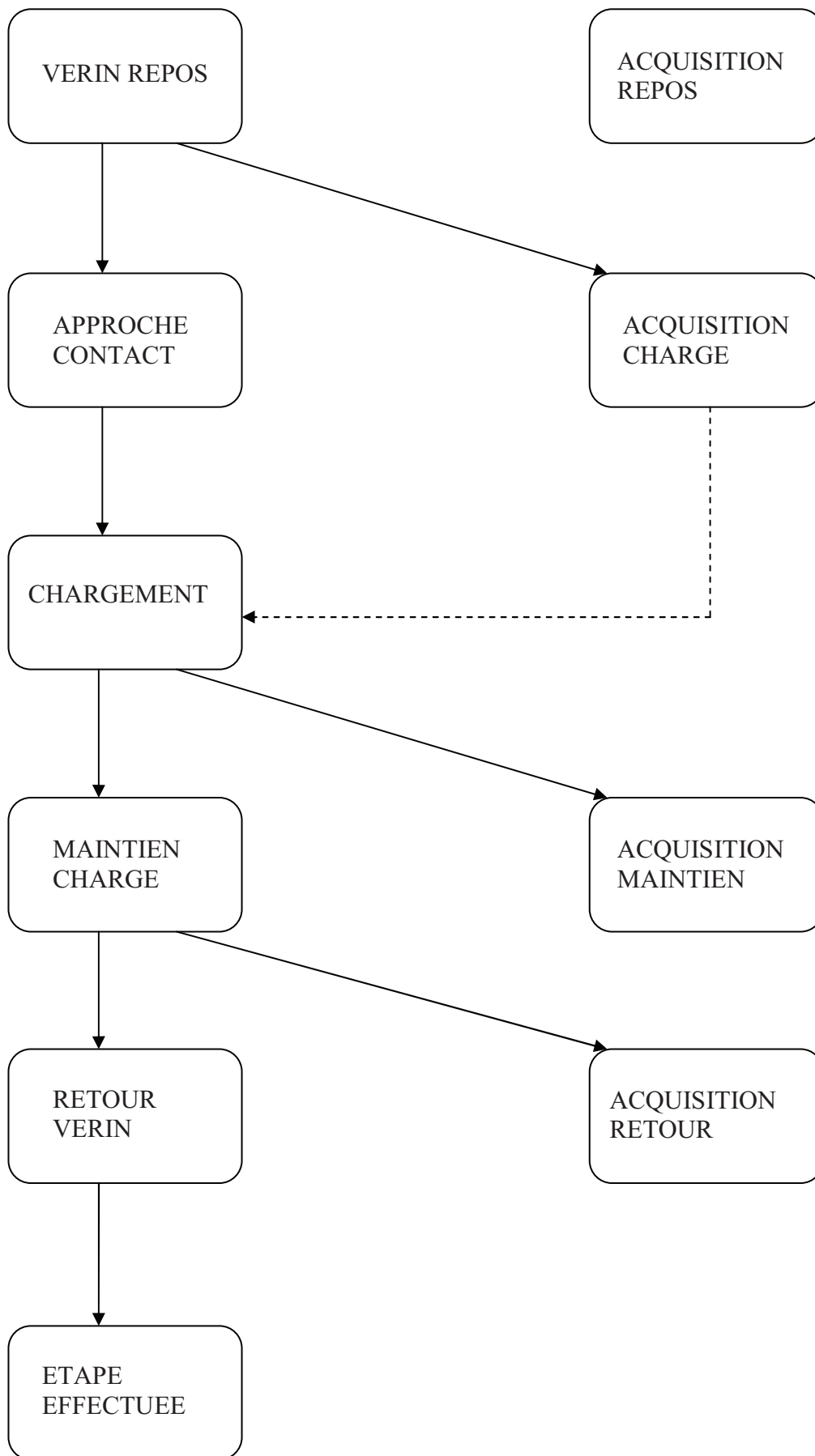


Figura 14.1

3.2.4.1. Carichi massimi raggiungibili in ciascun ciclo e comparazione con la curva reale delle resistenze a compressione

Analizzato come si andrà a svolgere la prova, appare quindi scontata la domanda: quale valore possono raggiungere gli sforzi per non arrivare mai, durante tutta la durata della prova, alla rottura del provino? E di conseguenza: quale valore di spostamento imporre?

Prima della realizzazione della prova MC014, infatti, non erano state effettuate prove concernenti la resistenza a compressione del calcestruzzo giovane in questione. Quindi prima della realizzazione della prova l'idea è stata quella di determinare una deformazione da imporre in modo da raggiungere circa il 50% del carico di rottura in compressione, stimato con delle prove fatte precedentemente [Boulay, 2010] sul calcestruzzo stesso, a 7, 14, 28, 90, 180 giorni e considerando una resistenza nulla al momento della presa.

L'evoluzione del modulo di elasticità calcolato per il calcestruzzo giovane, ha contribuito alla stima della resistenza in compressione attraverso un'espressione per stabilire una relazione tra i due parametri. I risultati di questa stima hanno portato ad individuare una deformazione di $350 \mu\text{def}$, e quindi spostamento $70 \mu\text{m}$, con un'altezza del provino di circa 0,2 metri. In questo modo si avrà quindi la sicurezza di non raggiungere la rottura del provino durante la prova.

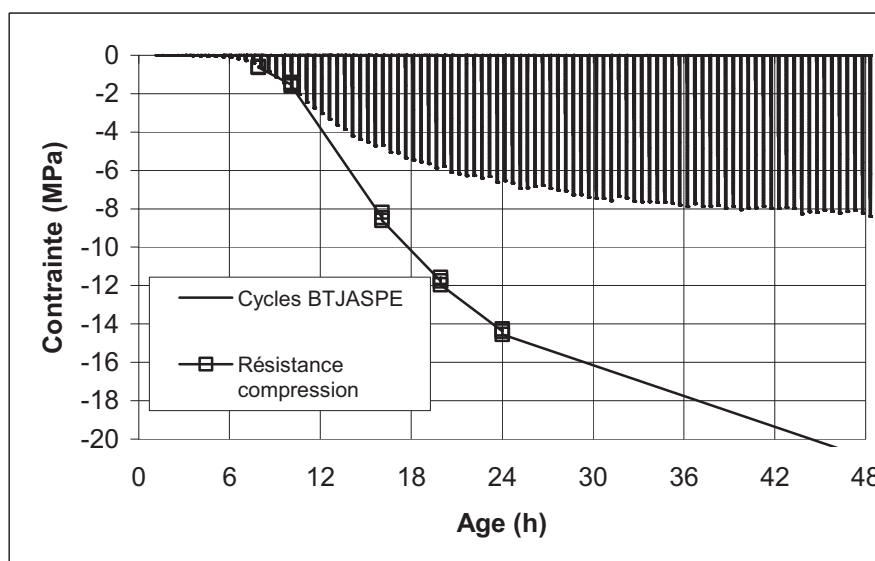


Figura 14.2

Il grafico precedente rappresenta l'evoluzione degli sforzi di picco raggiunti ad ogni ciclo della prova MC014, in rapporto allo sviluppo della resistenza in compressione nel calcestruzzo molto giovane, e che verrà vista in seguito. Si osserva che per la maggior parte del tempo, i valori raggiunti nella prova sono ben al di sotto di quelli della resistenza vera e propria. All'inizio invece, tra le 6 e le 10 ore, invece, i picchi sono a livello della curva della resistenza.

Ciò non ha avuto conseguenze sui risultati ottenuti, in quanto la curva del modulo di elasticità ottenuta da questa prova è in linea con quelle ottenute dalle curve precedenti [Boulay, 2010], come verrà visto nel paragrafo relativo al modulo di Elasticità.

Conoscendo ora questa evoluzione della resistenza, sarà più prudente per le prove che si faranno in futuro, diminuire il valore della deformazione imposta nelle 4 o 5 ore che seguono la presa. È importante inoltre conoscere, prima di effettuare la prova, l'evoluzione della resistenza del materiale in questione.

Si riporta quindi la curva dell'evoluzione del modulo di elasticità ottenuto dalla prova MC014, per poter definire l'istante si può considerare l'inizio della presa:

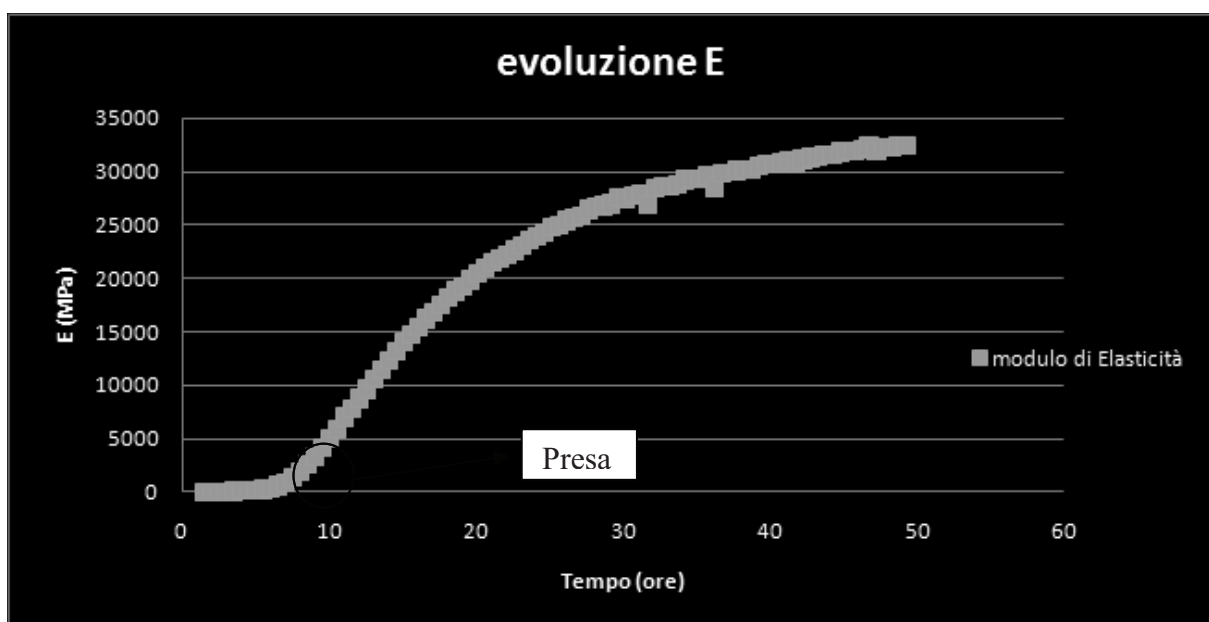


Figura 14.4

Il tempo di presa è definito come l'istante dove la curva di evoluzione del modulo di elasticità non ha più una tendenza a restare prossima a zero ma inizia ad aumentare per raccordarsi ad una parte quasi rettilinea. L'istante di presa, come rappresentato in figura 14.4, corrisponde alla base della virata della curva che va a raccordarsi con la parte rettilinea.

È inoltre la distanza in cui la velocità ultrasonora supera i 2800 m/s (il monitoraggio della presa tramite ultrasuoni è stato fatto su questo calcestruzzo. Dei lavori recenti [Rubeyst et al, 2008] [Boulay et al, 2010] [Pinto et al, 2010], mostrano inoltre che, quando la velocità supera 2800m/s, il modulo di elasticità è di circa 1GPa, che corrisponde al momento in cui un provino in calcestruzzo inizia ad essere manipolabile.). In questo caso il tempo di presa è fissato a 7,03 ore con un modulo di 893MPa.

3.2.4.2. Metodo per isolare il Fluage

3.2.4.2.1. Studio e modellizzazione del fluage

Tramite la programmazione della pressa, quindi, per la prova MC014 si è deciso di fare 96 cicli, di durata 30 minuti ciascuno, di cui uno è stato assemblato come segue:

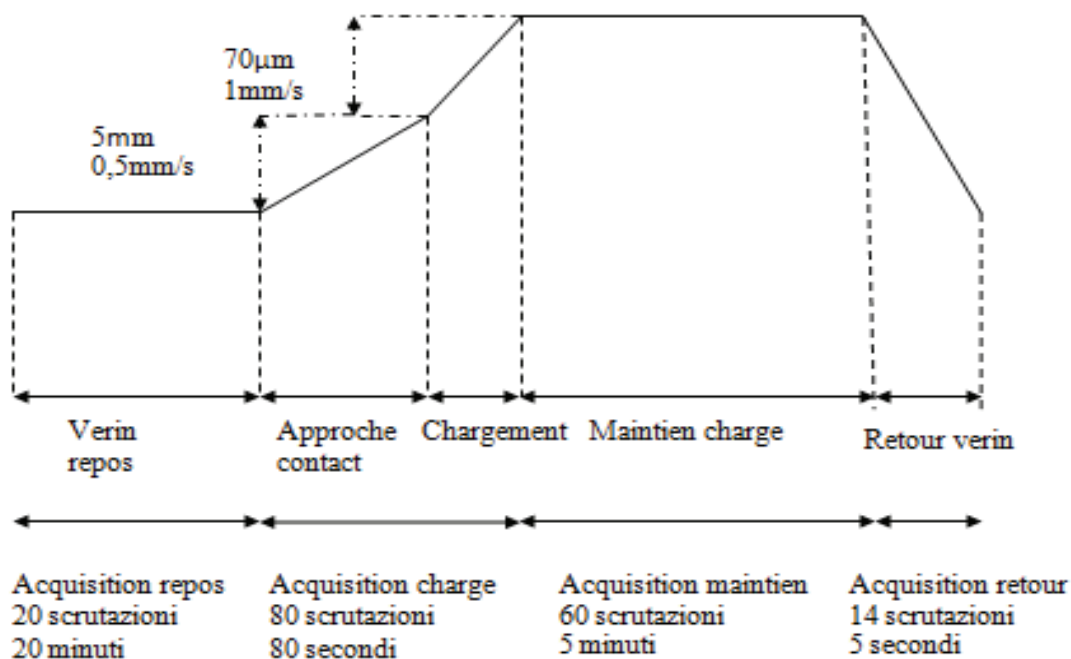


Figura 14.5

Si analizzano ora tutti i vari passi che compongono un ciclo:

1. Verin repos: il ciclo inizia con una fase a carico nullo (nessun contatto tra l'appoggio superiore ed il pistone per il carico) e dura 20 minuti
2. Approche contact: è effettuato con una velocità di spostamento del pistone di misura dell'appoggio superiore di 0,5 mm/s e dura 10 secondi circa (fino all'ottenimento del contatto dell'LVDT situato nell'appoggio conico superiore).
3. Chargement: è uno spostamento effettuato con una velocità di 1 $\mu\text{m/s}$, di durata 70 sec. Lo spostamento è la media degli spostamenti misurati dai 3 LVDT posti intorno al provino.
4. Maintien charge: fase a carico costante di durata 5 minuti.

5. Retour verin: è il ritorno del martinetto in una posizione dove non c'è più alcun contatto tra il pistone di carico e l'appoggio conico superiore. Dura 5 secondi

Viene fatta dunque la registrazione dei seguenti parametri: Tempo, Forza, Spostamento del Captore di contatto, Spostamenti dei 3 LVDT sulle colonne di BTJASPE e la media del loro spostamento, Temperatura della colonna.

Sotto gli effetti dello spostamento ($70 \mu\text{m}$) imposto per ogni ciclo, l'aumento del modulo di elasticità dovuto alla maturità del calcestruzzo, è mostrato nel grafico seguente:

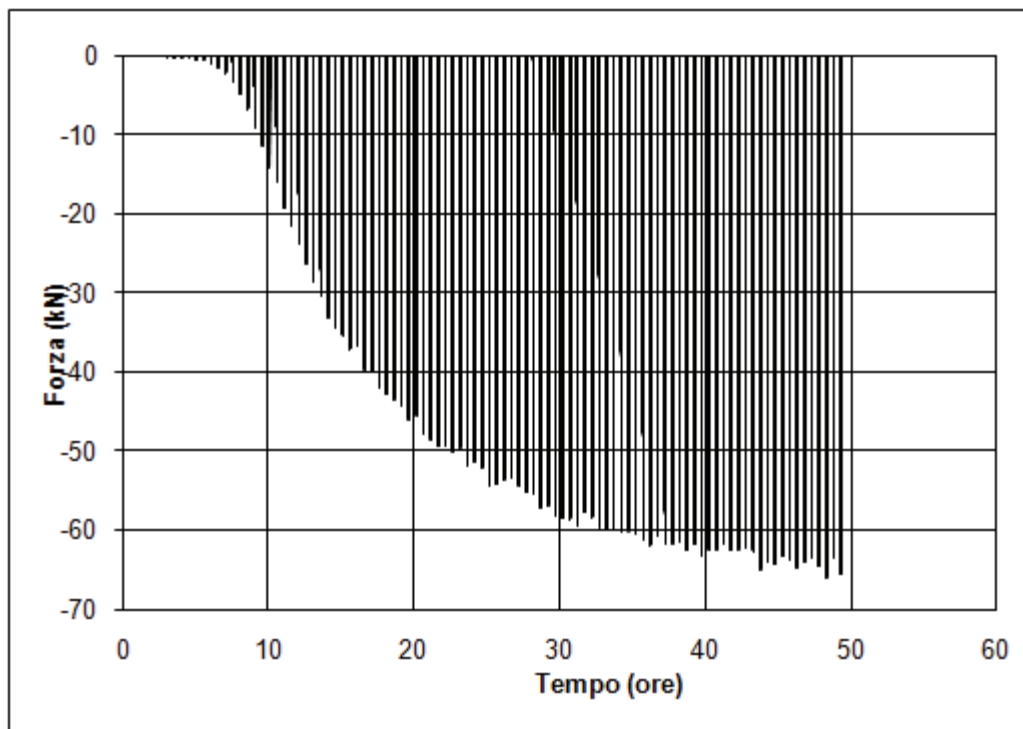


Figura 14.6

In questo grafico il periodo di fluage, presente ad ogni picco, è impossibile da vedere con questa scala. Si osserva invece che con l'aumentare del modulo di rigidità, il carico aumenta. Per mettere in evidenza un singolo ciclo, quindi, bisogna zoomare

l'immagine precedente, concentrandosi su un lasso di tempo breve. Per esempio si consideri il ciclo 19, corrispondente ad un'età del calcestruzzo, di 10 ore circa.

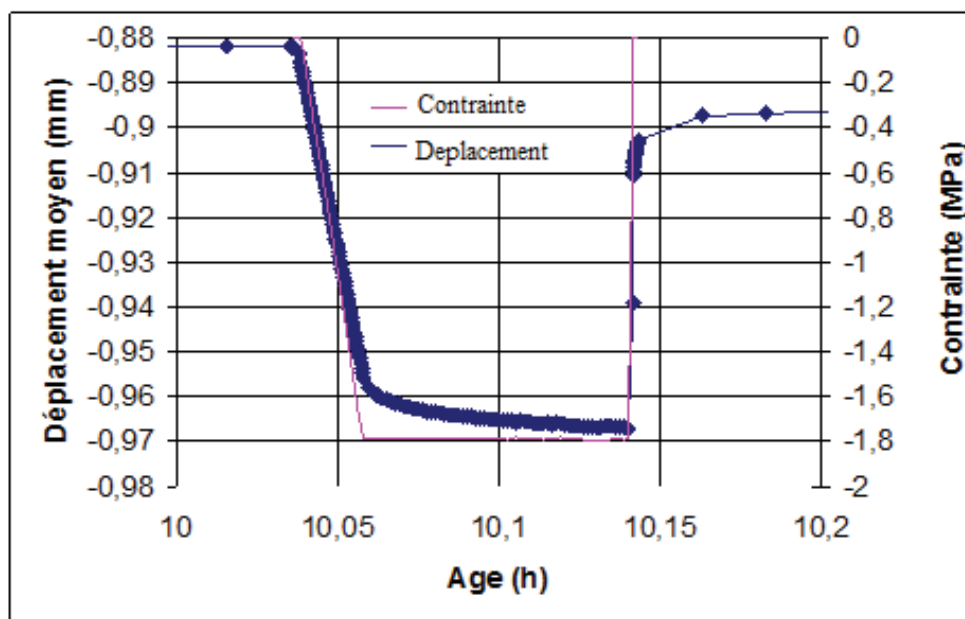


Figura 14.7

In questo grafico sono rappresentati lo spostamento medio e la forza mantenuta costante nell'intervallo di 5mn.

Il fluage è nettamente visibile nella fase di carico di 5 minuti.

Si tratta ora di cercare un modello analitico che permetta di descrivere ed approssimare al meglio il comportamento del calcestruzzo, rilevato tramite via sperimentale.

In letteratura esistono più modelli in grado di descrivere il comportamento visco-elastico di un materiale, quale il calcestruzzo. Quelli che permettono di descrivere le deformazioni differite sono i modelli reologici. Sono elaborati sulla base di elementi semplici quali molle e dissipatori viscosi, nello specifico, dei quali si riportano caratteristiche e funzionamento in Appendice.

In uno studio fatto precedentemente [Rey, 2004], è stato utilizzato il modello di Dirichlet, composto da tre elementi in serie, una molla e due cellule di Kelvin-Voigt, per descrivere il fluage specifico di un calcestruzzo ordinario maturo. Il modello ha dato buoni risultati. I parametri utilizzati per il fluage hanno permesso anche di calcolare la

funzione di rilassamento specifico (è la funzione inversa del fluage specifico), che si è dimostrata essere molto vicina alla curva ottenuta con i risultati sperimentali.

Per modellizzare il fluage, come precedentemente accennato, dapprima si è utilizzato un semplice modello di Kelvin-Voigt per poi passare a quello di Dirichlet, dimostratosi sicuramente più preciso.

Infatti, con il modello di Kelvin-Voigt non si è riusciti a ben interpolare la curva ricavata con i dati sperimentali: la corrispondenza tra analitico e sperimentale ha mostrato un'approssimazione ritenuta troppo elevata da accettarsi.

Per questo si è provato con un modello più complesso. Il modello di Dirichlet è dato da n cellule di Voigt messe in serie, con una molla anch'esse in serie.

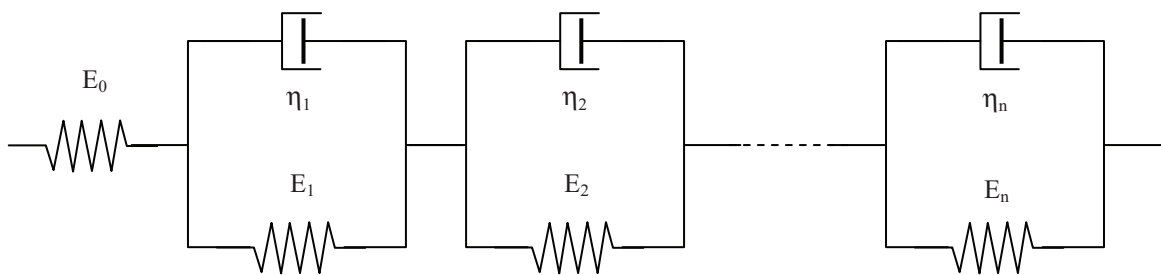


Figura 1.37

La risposta di questo modello all'applicazione di uno sforzo istantaneo (fluage) è dato dall'espressione seguente:

$$J(t) = \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{E_i} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right)$$

$J(t)$ è il fluage specifico che è dato dal rapporto tra deformazione di fluage $\epsilon(t)$ e lo sforzo costante applicato σ_0 . Il tempo t_0 corrisponde all'applicazione di questa sollecitazione.

Si ha che i dati sperimentali, per un numero di cellule di Voigt $n=2$, sono interpolati in maniera soddisfacente.

L'espressione precedente quindi diviene:

$$J(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right) + \frac{1}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right)$$

Con le costanti di tempo: $\tau_1 = \eta_1 / E_1$ e $\tau_2 = \eta_2 / E_2$.

I parametri incogniti E_1 , E_2 , τ_1 , τ_2 sono quindi da calcolare con un qualsiasi programma (nel nostro caso sono stati utilizzati sia Excel che CURXPT).

Si consideri ad esempio il ciclo 23, corrispondente a 12 ore di vita del calcestruzzo, quindi abbondantemente dopo la presa, i due modelli hanno fornito i risultati riportati nei grafici seguenti:

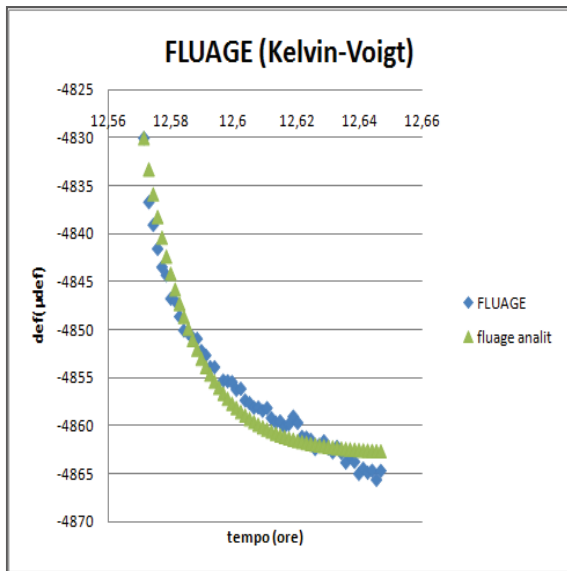


Figura 14.8

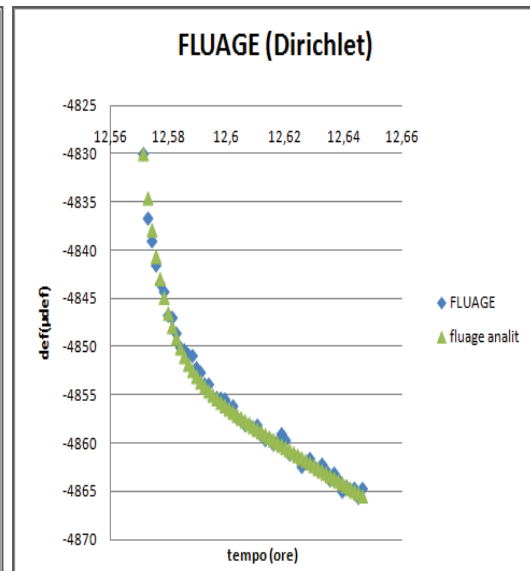


Figura 14.9

In ogni grafico sopra riportato, sono presenti due curve sovrapposte, l'una denominata "FLUAGE" che fornisce l'andamento della deformazione, ottenuta dall'elaborazione dei dati rilevati dalla prova; l'altra "fluage analitico" ottenuta tramite la funzione analitica, presentata in precedenza, che descrive il fluage. I parametri incogniti dell'equazione del fluage sono stati fatti variare, tramite il risolutore Excel, che utilizza il metodo dei minimi quadrati (il risolutore minimizza la somma dei quadrati delle differenze tra valori sperimentali e valori calcolati analiticamente).

Nella risoluzione che si è scelto di utilizzare, la parte elastica data dal termine $1/E_0$ non è stata presa in conto, in quanto si sono considerate solo le parti di ciclo relative al solo fluage e quindi già depurate dalla parte elastica.

Si può quindi vedere come con il modello di Dirichlet sia possibile interpolare con buona precisione la curva ottenuta sperimentalmente.

Tuttavia per alcuni cicli il risultato ottenuto non è stato ritenuto del tutto soddisfacente, in quanto la funzione trovata con Dirichlet non interpolava nel modo migliore le pendenze ottenute dalla curva rappresentante la sperimentazione.

Si è quindi deciso di basare la modellizzazione sempre sul modello di Dirichlet, ma introducendo il concetto di “fluage specifico”.

3.2.4.2.1 Modellizzazione basata sul modello di Dirichlet applicato al fluage normalizzato

Innanzitutto, al fine di meglio comprendere le ipotesi e i ragionamenti fatti nel corso della trattazione, si riporta la notazione utilizzata:

t : tempo reale che coincide con il tempo equivalente del provino (la prova è fatta a 20°C costanti -> tempo = tempo equivalente)

t_{0i} : tempo di inizio fluage o rilassamento del ciclo i -esimo

t_{5i} : tempo di fine fluage o rilassamento (5 minuti da t_{0i}) del ciclo i -esimo

$E_0(t)$: Modulo di elasticità al tempo t

$E_1(t)$: Modulo di elasticità della cellula 1 del modello di Dirichlet

$E_2(t)$: Modulo di elasticità della cellula 2 del modello di Dirichlet

$\tau_1 = \eta_1/E_1$ costante di tempo relativa alla cellula 1 del modello di Dirichlet

$\tau_2 = \eta_2/E_2$ costante di tempo relativa alla cellula 2 del modello di Dirichlet

Come già detto in precedenza, per sollecitare il provino in questione a fluage, si è utilizzata la programmazione con TESTWARE SX, di cui sotto è riportato un ciclo, per avere un'idea più precisa di ciò che avviene sia a livello di sforzi che di deformazioni. Si ha inoltre una rappresentazione dei concetti di t_0 e t_5 :

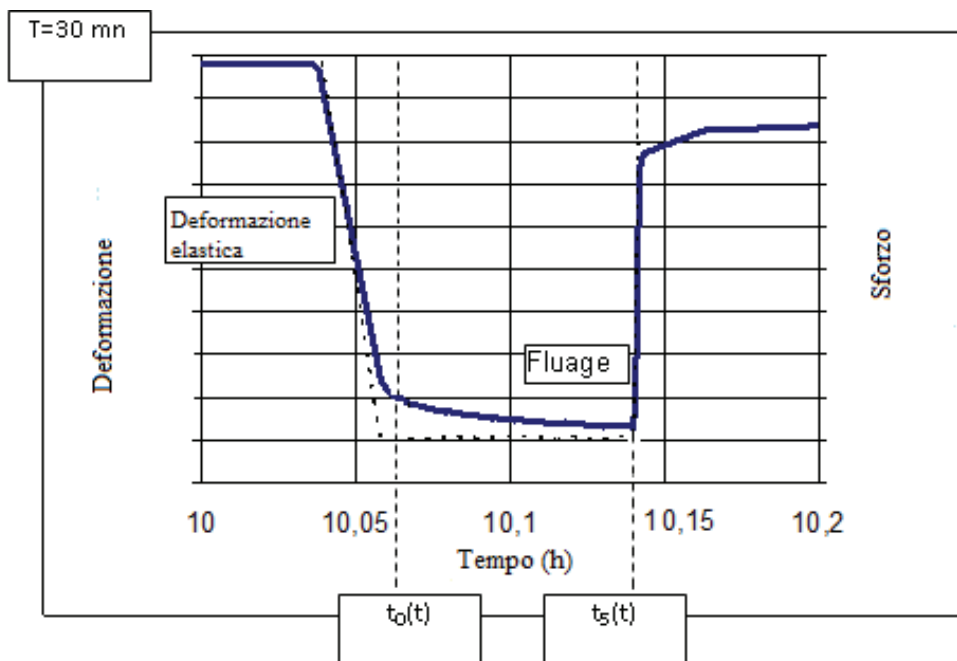


Figura 14.10

Il grafico precedente rappresenta quindi, un ciclo di carico (linea tratteggiata) e di fluage (linea continua). Il fluage ha inizio quando lo sforzo raggiunge il tratto per cui si manterrà costante (si ha la deformazione di $350 \mu\text{def}$). Questo istante è detto $t_0(t)$. Il tratto a sforzo costante termina dopo 5 minuti, all'istante detto $t_5(t)$. La deformazione di fluage si sviluppa quindi tra questi due istanti.

Prima del palier a sforzo costante, e quindi tra la fine dell'intervallo iniziale a carico nullo e $t_0(t)$, il provino è sollecitato a una velocità imposta di spostamento ($1 \mu\text{m/s}$ o $5 \mu\text{def/s}$). In questo segmento, il comportamento è elastico lineare ed è possibile determinare il modulo di elasticità $E_0(t)$. All'istante $t_5(t)$ la forza ritorna a zero e ciò segna l'inizio del segmento a carico nullo.

Operativamente parlando per la prova MC014 sono stati ricavati i grafici sotto riportati. Per chiarezza si elencheranno tutti gli step eseguiti durante la manipolazione dei dati sperimentali:

1. Per ogni ciclo ottenuto dalla pressa si è isolato l'intervallo di tempo e i valori relativi alla deformazione, ottenuti nella parte di ciclo inerente al fluage. Si è dunque costruita un'unica scala temporale, in quanto la medesima per ogni ciclo: il rilevamento della deformazione relativa al fluage avviene con intervallo

regolare. Si sono inoltre scalate tutte le curve relative al fluage, rispetto al primo valore di deformazione ε_0 (quello rilevato all'istante t_0) facendo così in modo che tutte avessero l'origine in comune (0;0)

Il grafico ottenuto è:

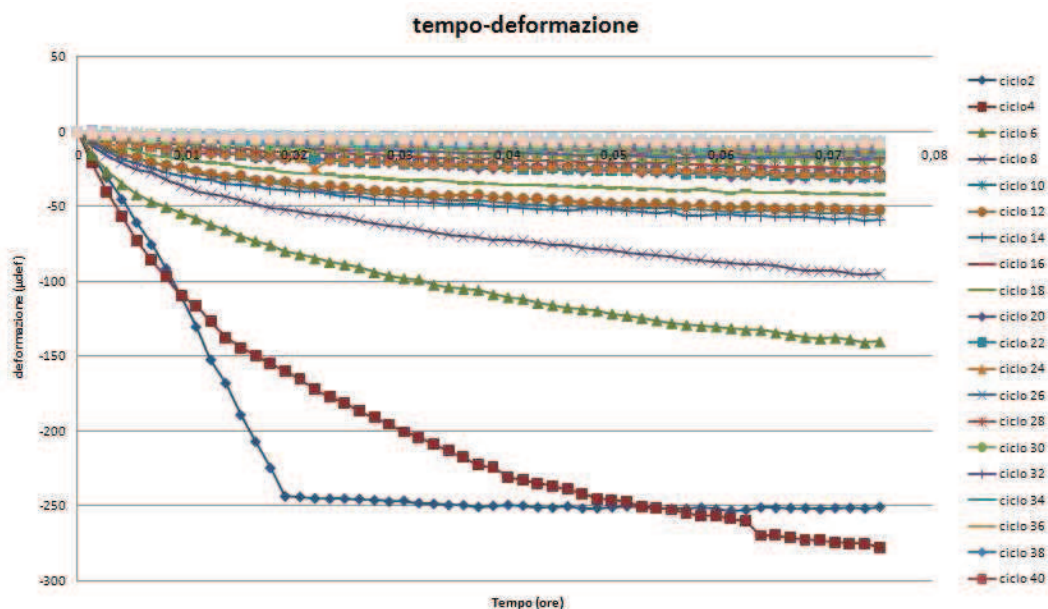


Figura 14.11

Nel grafico precedente, quindi, sono rappresentati tutti i cicli effettuati nella prova MC014. Sono presenti 48 curve che rappresentano le modalità di sviluppo della deformazione in funzione del tempo, per una forza, ad ogni ciclo, mantenuta costante. Si è scelto infatti di analizzare la metà dei cicli registrati, per ragioni di tempo. Nella legenda, per problemi di spazio, si sono indicati solo i primi 40 cicli (20 curve), le curve rappresentate sono però 48.

Come si può osservare dall'immagine, l'ampiezza della curve rappresentante i valori della deformazione, diminuisce con l'aumentare del numero del ciclo e quindi del tempo.

Si noti come i cicli che vanno da 2 a 10 siano quelli ottenuti prima della presa del materiale; per i motivi già più volte spiegati in precedenza, si sceglie di non considerare più le curve relative alla deformazione che si ha per questo periodo

2. Per avere però un riscontro del comportamento del materiale relativo alla diminuzione delle deformazioni rilevate, si è divisa la deformazione stessa, rappresentata nel grafico su riportato, per la media dello sforzo applicato durante la parte del ciclo inerente al fluage. Lo sforzo infatti, che è mantenuto costante durante il ciclo di fluage, varia da ciclo a ciclo; infatti la taratura dello sforzo da mantenere costante è dato dall'entità dello sforzo necessario ad avere una deformazione imposta, di $350\mu\text{def}$. Poiché il materiale in questione è risaputo essere caratterizzato dall'aver delle proprietà che evolvono nel tempo, in primis il modulo di elasticità di Young, E , è chiaro come lo sforzo necessario ad avere una deformazione fissa, cresca nel tempo

Il grafico ottenuto, per il fluage specifico, è:

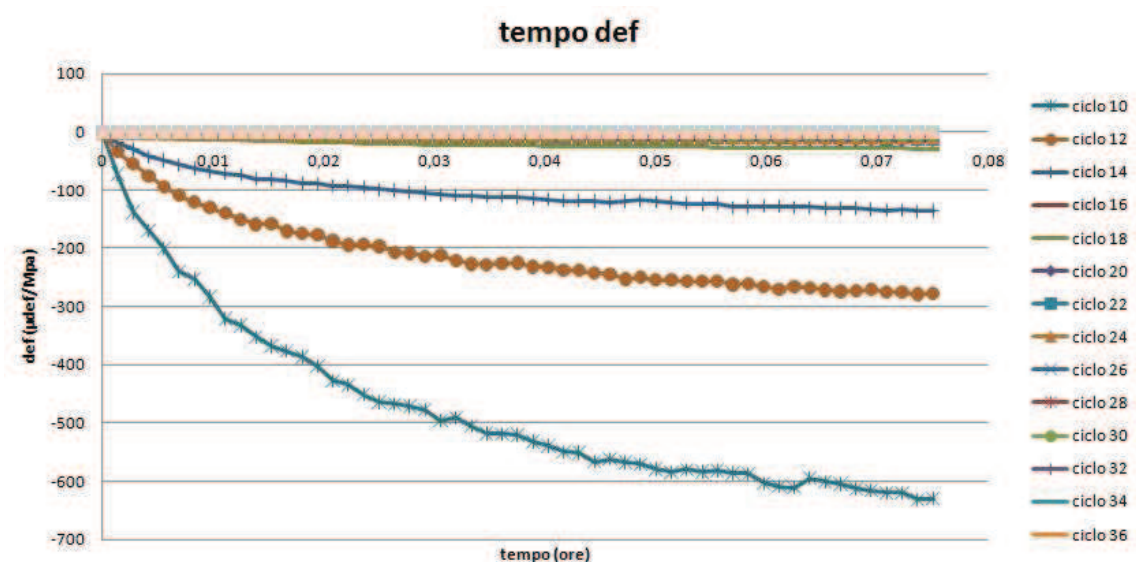


Figura 14.12

L'andamento delle curve è lo stesso che si era individuato precedentemente. Ciò implica necessariamente che ci si trova di fronte ad un materiale "invecchiante": le sue caratteristiche di resistenza e rigidezza variano ancora con il tempo.

Se si fosse infatti considerato un materiale già maturo e non invecchiante e si fossero quindi considerate le curve relative al fluage del materiale stesso, nel preciso momento in cui si fossero divise le curve stesse per lo sforzo applicato, si sarebbe ottenuta, per tutti i casi la stessa curva.

3. Il problema di lissage già citato sopra, ha fatto sì che si trovasse un metodo fare apparire la forma di queste curve di fluage.

Il passo successivo è stato dunque quello di normalizzare tutte le curve di fluage specifico (deformazione/sforzo) dividendole per il valore del fluage specifico di ciascuna curva, registrato a t_{5i} . In questo modo si ottengono delle curve normalizzate, con origine in 0 ed ordinata massima 1.

Il grafico ottenuto è:

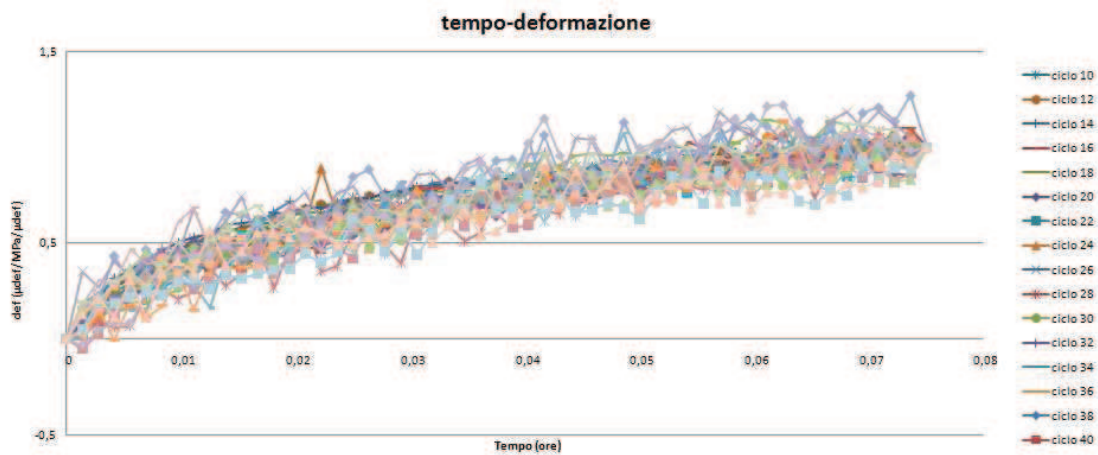


Figura 14.13

È interessante vedere come ora tutti i cicli siano ridotti ad avere praticamente la stessa curva che descrive il loro fluage. Infatti qualora si trovasse una curva media di quelle rappresentate nel grafico precedente, basterebbe cambiarne l'ampiezza per poter descrivere il fluage relativo a ciascun ciclo.

4. Si è quindi proceduto su questa linea, individuando come media la curva:

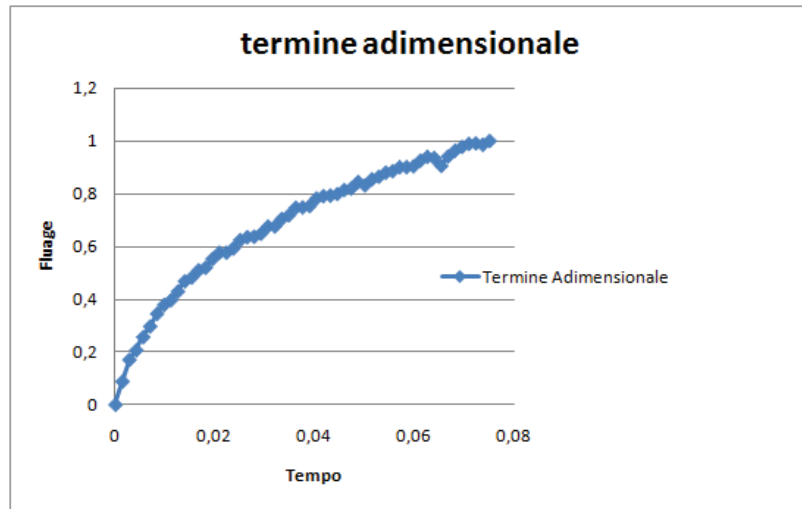


Figura 14.14

A partire dalle osservazioni precedenti, si può immaginare che il fluage specifico di un ciclo al tempo t , sia esprimibile attraverso un termine adimensionale, $\Omega(t-t_0)$, indipendente dalla maturità, che descrive l'evoluzione, su un intervallo di 5 minuti, del fluage specifico. È possibile inoltre calcolare il fluage specifico ad ogni istante t , moltiplicando il termine adimensionale di cui sopra, per un'ampiezza, $A_f(t)$, funzione quest'ultima della maturità.

$$J(t-t_0) = A_f(t) \Omega(t-t_0)$$

Schematicamente il modello di Dirchlet utilizzato, come già detto precedentemente, è:

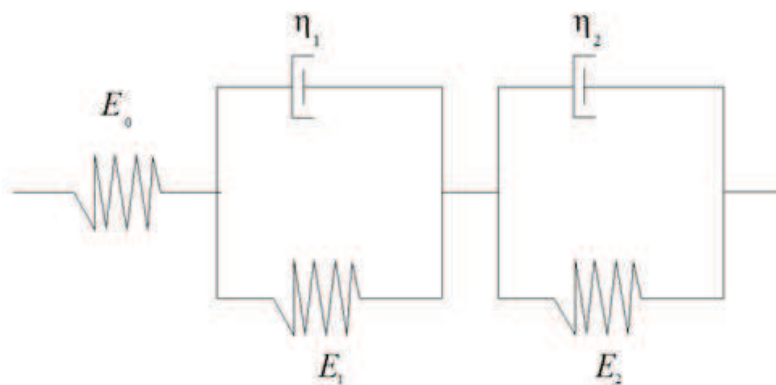


Figura 1.38

La risposta di questo modello a una sollecitazione al tempo t_0 è data da:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \times \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right) + \frac{1}{E_2} \times \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right) \quad \rightarrow x.1$$

Con: $\tau_1 = \eta_1/E_1$ e $\tau_2 = \eta_2/E_2$, costanti di tempo.

I parametri incogniti quindi da calcolare sono: E_1, E_2, τ_1, τ_2 .

La componente di fluage specifico (deformazione specifica totale meno deformazione specifica elastica) è esprimibile come:

$$J(t - t_0) - \frac{1}{E_0} = \frac{1}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_1}\right) \right] + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_2}\right) \right] \quad \rightarrow x.2$$

Il fluage specifico al tempo t , prodotto di un termine adimensionale e di un termine ampiezza, come detto prima, si può esprimere come:

$$J(t - t_0) - \frac{1}{E_0(t)} = A_f(t) \left\{ C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau'_1}\right) \right] + C_2 \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau'_2}\right) \right] \right\} \quad \rightarrow x.3$$

Il termine adimensionale, che è funzione del tempo di fluage ($t-t_0$), è scelto con forma simile a quella della funzione di Dirichlet. E' uguale alla media dei fluage specifici normalizzati per il loro valore a 5 minuti.

Le formulazioni adottate per descrivere il fluage teorico (x.2) e quello sperimentale (x.3) possono essere messe in relazione in modo da trovare un'espressione per i parametri teorici E_1, E_2, τ_1 e τ_2 .

$$\frac{1}{E_1} = A_f(t) C_1 \quad \text{e} \quad \frac{1}{E_2} = A_f(t) C_2$$

$$\tau_1 = \tau'_1 \quad \text{e} \quad \tau_2 = \tau'_2$$

Con l'aiuto di questo modello è quindi possibile interpolare la curva media ottenuta per il fluage. Si è utilizzato il programma CURXPT, che utilizza il metodo dei minimi quadrati.

Dall'interpolazione di questa curva con il modello di Dirichlet, si hanno i seguenti valori per i parametri incogniti, che si ricordano essere: E_1, E_2, τ_1, τ_2 .

E1	3,0906
τ_1	0,0067
E2	0,915
τ_2	0,077

Tabella 14.1

Il risultato è il seguente:

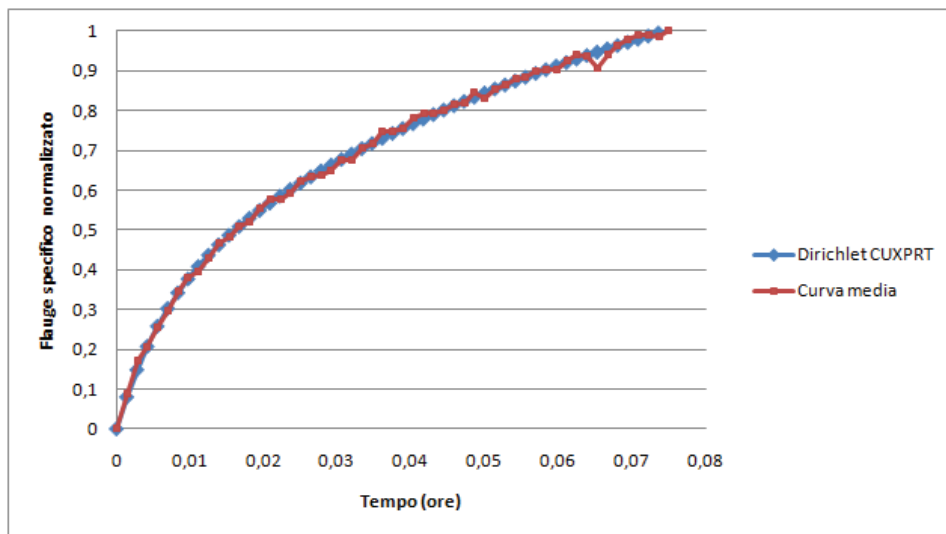


Figura 14.15

Per quanto riguarda quindi l'ampiezza, il termine che la descrive è:

$$A_f(t) = J(t_5(t)) - J(t_0(t)) \quad \rightarrow \times 4$$

Questa espressione rappresenta l'ampiezza del fluage specifico su 5 minuti, al tempo t.

Per la prova MC014 si è tracciata la curva rappresentativa dell'ampiezza (data dal fluage specifico di ogni circo all'istante t_5) in funzione del tempo della prova a 20°C, che corrisponde anche al tempo equivalente.

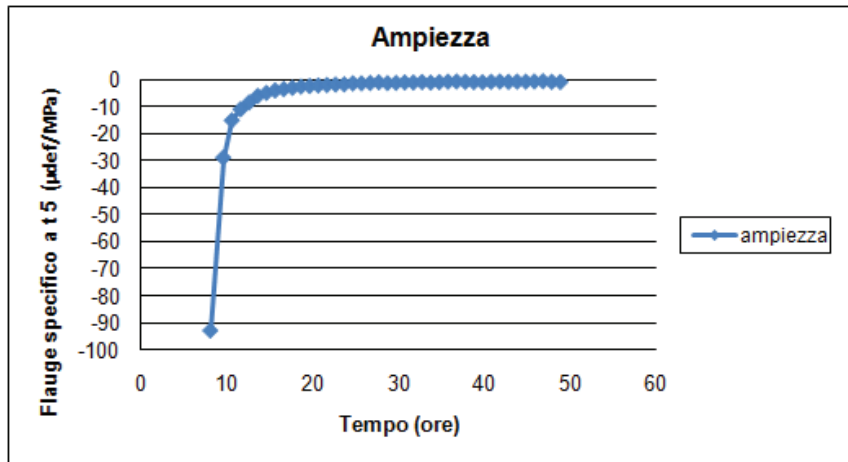


Figura 14.16

Si presenta inoltre il grafico relativo all'ampiezza in funzione in funzione del grado di idratazione:

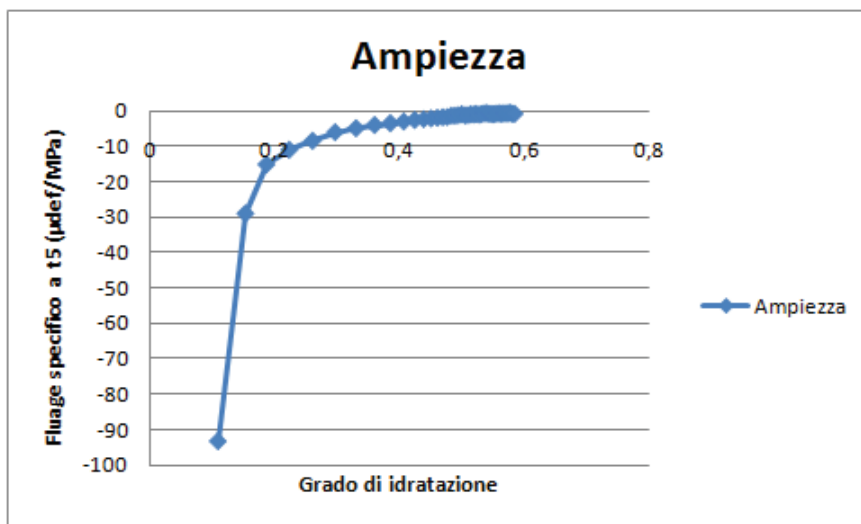


Figura 14.17

Il termine relativo all'ampiezza è descritto dalla funzione matematica, sotto riportata, che permette di interpolare l'ampiezza ottenuta sperimentalmente, in funzione del grado di idratazione:

$$A_f(\xi) = k_s \left\{ \sum [A_i \tanh(\xi(t_{eq}) - \xi(t_{eq0i})s_i + 1)] - A_0 \right\}$$

Questa forma matematica è simile a quella utilizzata per l'espressione del grado di idratazione in funzione del tempo equivalente. In questo caso, si utilizza la somma di due tangenti iperboliche ($i=2$). La tabella seguente illustra i parametri utilizzati e i loro valori:

A_i	Ampiezza	939,75	616,59
$\xi(t_{eq} 0i)$	Ordinata di origine	-0,4050	0,06145
s_i	Pendenza	3,585	21,52
A_0	Sfasamento secondo l'asse y	0	
k_s	Ampiezza globale	1	

Tabella 14.2

Si riporta in seguito il grafico rappresentante i punti sperimentali e la curva ottenuta con la funzione matematica sopra descritta:

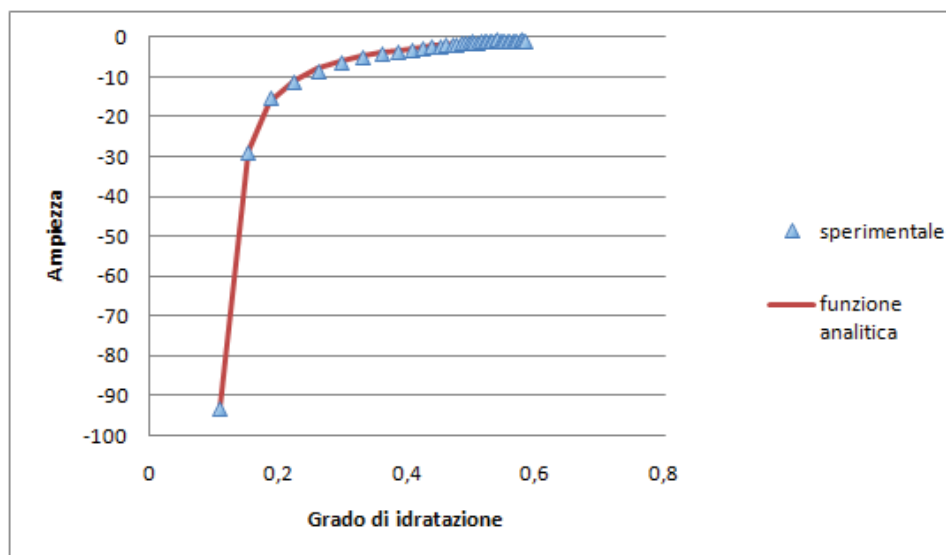


Figura 14.18

Come esempi esplicativi si considerano i cicli 20, 32 e 42, pari rispettivamente a 10,6 ore, 16,3 ore e 21,6 ore dal getto del calcestruzzo.

Per quanto riguarda il ciclo 20, si ha che l'Ampiezza, per il caso in esame, calcolata tramite la funzione matematica prima esposta $A_f(\xi)$, vale -16,36 ($\mu\text{def}/\text{MPa}$).

Dal confronto quindi tra modello analitico, ottenuto moltiplicando il valore dell'Amplitude per il valore dato dalla funzione di Dirichlet per ogni istante temporale del ciclo in questione, e dati sperimentali si ricava il seguente grafico:

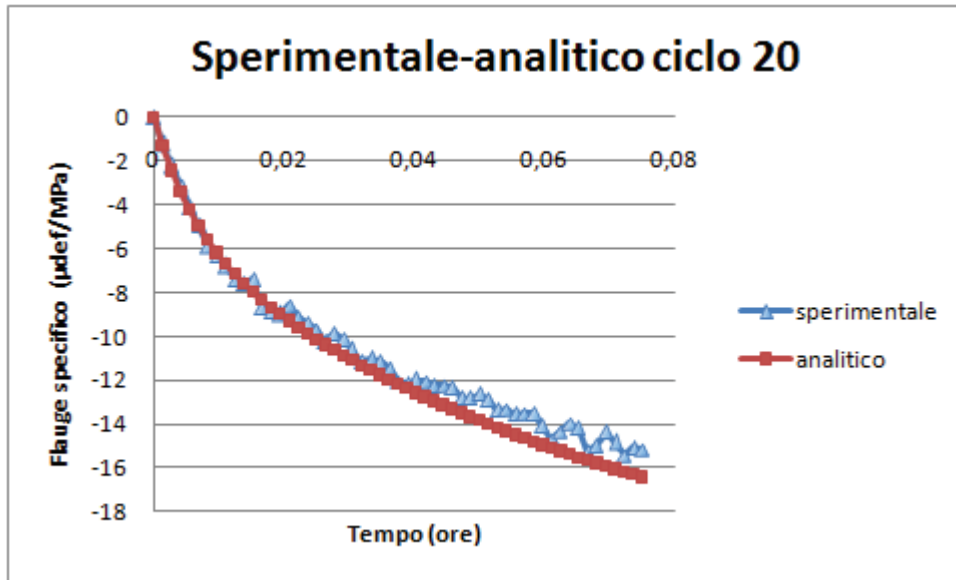


Figura 14.19

Per il ciclo 32, l'ampiezza calcolata vale $-3,45(\mu\text{def/MPa})$. Si ottiene il seguente grafico:

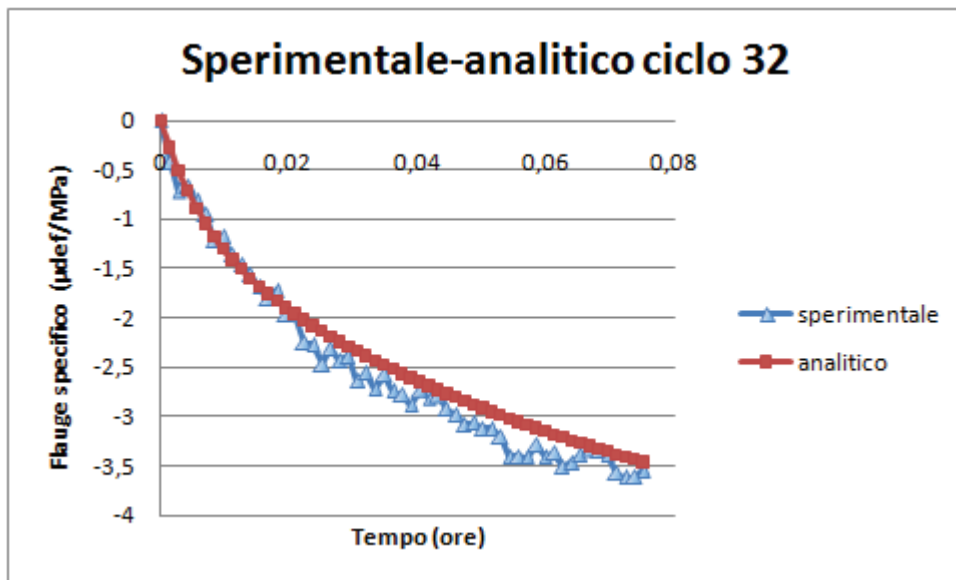


Figura 14.20

Per il ciclo 42 invece l'ampiezza calcolata risulta di $-1,91(\mu\text{def/MPa})$; si ha il seguente grafico:

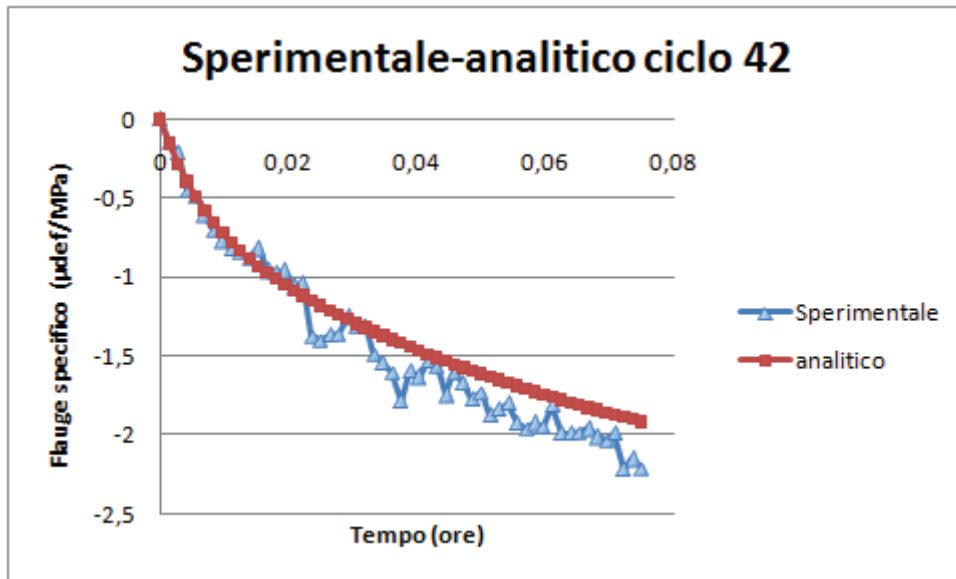


Figura 14.21

Come si può vedere dai grafici sopra riportati, il modello è molto preciso. Si è quindi trovata una funzione matematica molto buona per descrivere l'ampiezza delle curve di fluage, in funzione della maturità del materiale.

Si può inoltre vedere come più aumenti il ciclo e quindi il tempo, più si abbia un discostamento tra sperimentale e analitico. Ciò è spiegabile con il fatto che più trascorre il tempo e più l'ampiezza di fluage diminuisce e quindi diventa più difficile avere una buona precisione di misura.

3.2.4.2.3. Utilizzo del modello per la simulazione del comportamento a jeune âge

Questa simulazione può essere integrata in un calcolo numerico incrementale che fornisce ad ogni passo una predizione del fluage al passo successivo. Questo protocollo non permette, comunque, di fare delle predizioni che vadano al di là dei dati sperimentali registrati. Vale a dire che la precisione del metodo in questione, a lungo termine non è garantita. Lo sarebbe nel caso in cui si avesse una descrizione affidabile relativa all'evoluzione del termine Ampiezza, cosa che in questo caso non è possibile dimostrare con la sola prova realizzata.

L'incremento di tempo del calcolo numerico, inoltre, deve necessariamente essere inferiore al segmento costante relativo al fluage sperimentale. In questo modo, la precisione della predizione sul passo di tempo della simulazione numerica non dipende da altro se non dalla bontà con cui sono stati trattati i dati sperimentali.

Qualora si comprovasse la validità del modello, si riuscirebbe a completare la simulazione del comportamento della struttura, includendo anche i fenomeni di ritiro e fluage a jeune age.

Perché ciò sia possibile conviene quindi realizzare delle prove analoghe a quella effettuata, ma con delle durate di carico più o meno lunghe, così da comprovare questo approccio per il comportamento a fluage del calcestruzzo a jeune âge.

3.2.5 Prova di Rilassamento

MC015: Prove di rilassamento ripetute in compressione e modellizzazione

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 09/12/2010 10:35:00 (getto)
- Inizio delle misure: 11:44:39
- Condizioni di prova: Tacqua costante a 20°C; Tambiente costante a 20°C.
- Scopo della prova: studio del comportamento del calcestruzzo giovane a rilassamento

Prima di passare all'approfondimento di modalità di esecuzione e risultati ottenuti con la prova di rilassamento, si presenta l'evoluzione del modulo di elasticità ricavato dalla prova in questione (figura 15.1).

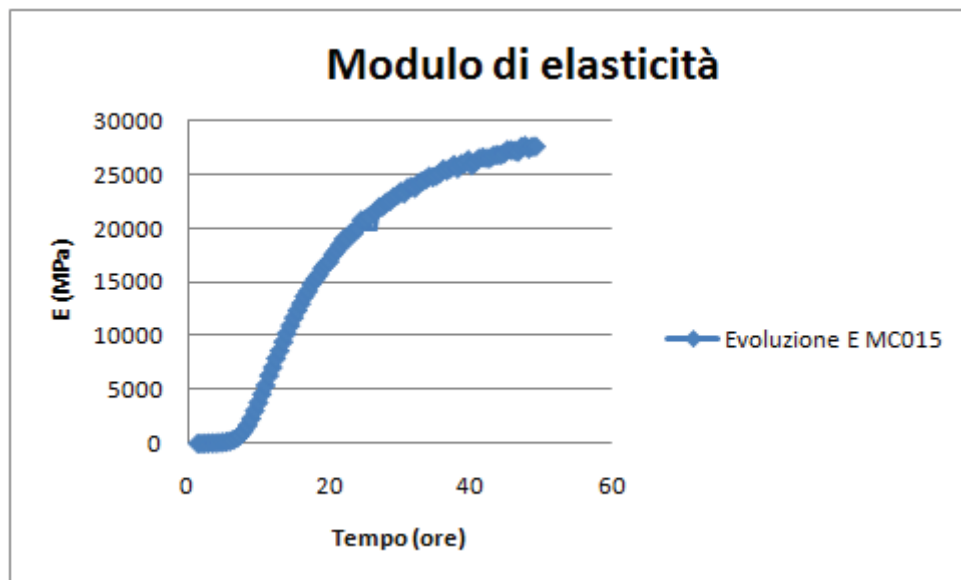


Figura 15.1

Facendo riferimento all'andamento della curva del grafico, si fissa come tempo di presa, secondo i criteri descritti in precedenza per il fluage, a 8 ore circa dal getto, con E pari a circa 1196 MPa. Si osserva una differenza in rapporto a quanto detto nella prova MC014, che può essere spiegata per il fatto che la colata e l'impasto sono stati fatti a mano, in piccole quantità (2,5 litri) e in un piccolo recipiente.

Come è si riscontra nel grafico riportato l'andamento del modulo è quello che si è riscontrato anche nelle prove precedenti. Messo infatti a confronto con quello ottenuto nella prova di fluage, si ha:

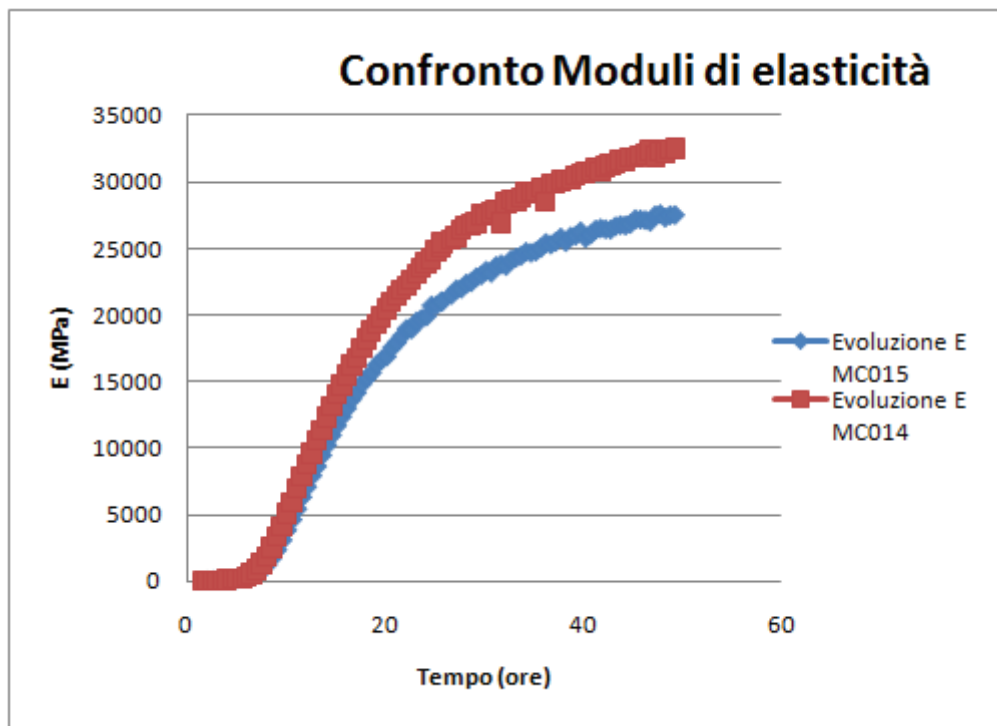


Figura 15.2

Come si vede dal grafico sopra riportato, il tratto iniziale delle due curve coincide perfettamente. Si riscontra invece una differenza di valori assunti dal modulo elastico a partire dalle 20 ore di vita del materiale.

Come già detto, questa differenza, che aumenta con il tempo, può essere spiegata con il fatto che il calcestruzzo, in entrambi i casi, è stato gettato e lavorato a mano e quindi non con procedure automatizzate; ciò implica una differenza nella lavorazione che può portare a differenze nei valori del modulo elastico raggiunti.

Si passa ora ad analizzare la procedura utilizzata per la realizzazione della prova a rilassamento.

Il carico di rilassamento è applicato per 5 minuti ogni 30 minuti. Più precisamente ancora questo carico è dato dall'applicazione di uno spostamento (lo stesso per ogni

ciclo) seguito da una fase di mantenimento di deformazione stessa. In altre parole, lo sforzo cambia finché raggiungo uno spostamento di $70\ \mu\text{m}$, come spiegato in seguito. La deformazione imposta è quindi mantenuta costante per 5 minuti, nei quali si registra la variazione delle forze.

Ogni 30 minuti quindi, si è ripetuto lo stesso ciclo:

- Un palier a carico nullo
- Una deformazione imposta
- Un intervallo a deformazione costante di durata 5 minuti, in cui si registra la variazione delle forze
- Un ritorno a carico nullo

La forma del ciclo programmato in TESTWARESX è la stessa utilizzata per il fluage; si è solamente modificato il controllo della prova in spostamento, invece che in forza, durante il segmento costante a $350\ \mu\text{def}$.

Si riporta quindi la rappresentazione di un ciclo:

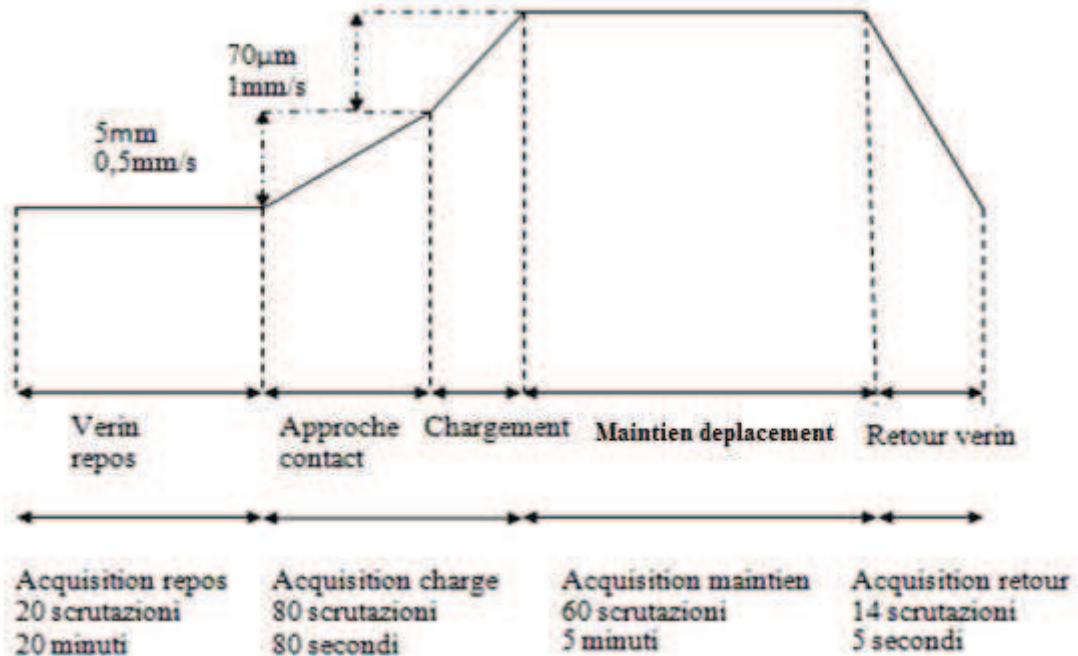


Figura 15.3

Si analizzano ora tutti i vari passi che compongono un ciclo:

1. Verin repos: il ciclo inizia con una fase a carico nullo (nessun contatto tra l'appoggio superiore ed il pistone per il carico) e dura 20 minuti
2. Approche contact: è effettuato con una velocità di spostamento del pistone di misura dell'appoggio superiore di 0,5mm/s e dura 10 secondi circa (fino all'ottenimento del contatto dell'LVDT situato nell'appoggio conico superiore).
3. Chargement: è uno spostamento effettuato con una velocità di 1 $\mu\text{m/s}$, di durata 70 sec. Lo spostamento è la media degli spostamenti misurati dai 3LVDT posti intorno al provino.
4. Maintien deplacement: fase a deformazione costante di durata 5 minuti.
5. Retour verin: è il ritorno del martinetto in una posizione dove non c'è più.

L'acquisizione dei dati è stata possibile grazie a programma TESTWARE SX la cui architettura si presenta identica a quella utilizzata per il fluage.

Il risultato quindi in termini generali si presenta come:

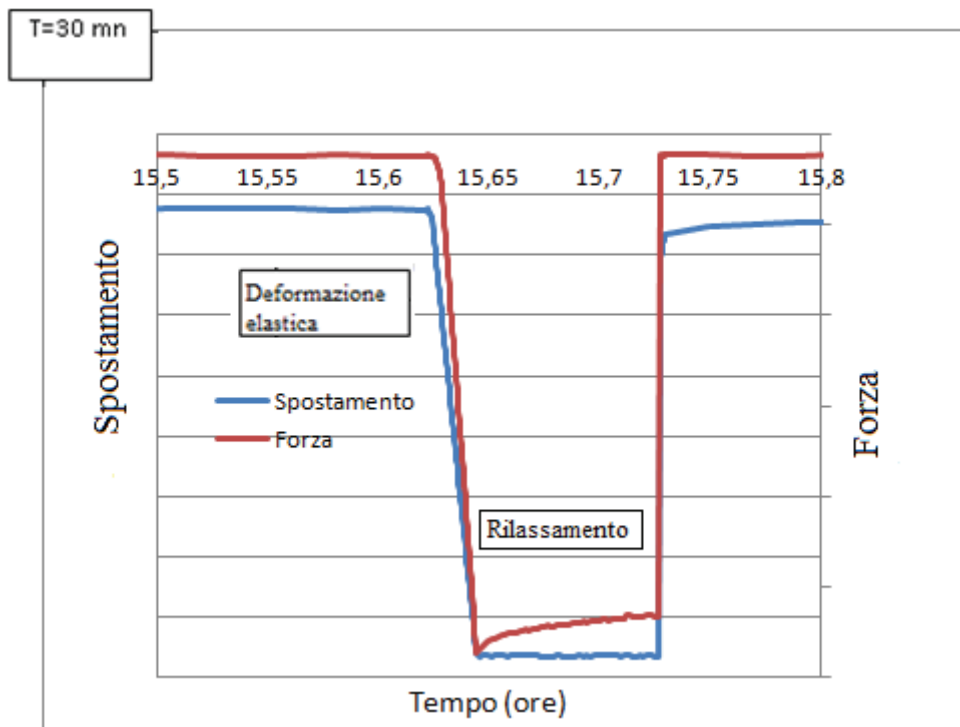


Figura 15.4

Il grafico precedente rappresenta quindi, un ciclo realizzato per lo studio del rilassamento. Sono rappresentati l'andamento dello spostamento medio (linea blu), che come si nota ha un tratto ad andamento costante, e del rilassamento delle forze (linea rossa). Il rilassamento ha inizio quando lo sforzo raggiunge il valore per cui si ha la deformazione di $350\text{ }\mu\text{def}$. Questo istante è detto $t_0(t)$. Il tratto a deformazione costante termina dopo 5 minuti, all'istante detto $t_5(t)$. La deformazione di rilassamento si sviluppa quindi tra questi due istanti.

Prima del palier a deformazione costante, e quindi tra la fine dell'intervallo iniziale a carico nullo e $t_0(t)$, il provino è sollecitato a una velocità imposta di spostamento ($1\text{ }\mu\text{m/s}$ o $5\text{ }\mu\text{def/s}$). In questo segmento, il comportamento è elastico lineare ed è possibile determinare il modulo di elasticità $E_0(t)$. All'istante $t_5(t)$ la forza ritorna a zero e ciò segna l'inizio del segmento a carico nullo.

3.2.5.1 Modellizzazione basata sul concetto di rilassamento normalizzato

Per lo studio del rilassamento specifico si utilizza quindi un procedimento analogo a quello utilizzato per il fluage, al fine di poter ricavare anche in questo caso una curva media di rilassamento specifico normalizzata, che moltiplicata per un'ampiezza, potrà descrivere il processo di rilassamento di qualsiasi ciclo (funzione del tempo).

A partire quindi dalle osservazioni precedenti, si può immaginare che il rilassamento specifico di un ciclo al tempo t , sia esprimibile attraverso un termine adimensionale, indipendente dalla maturità, che ne descrive l'evoluzione, su un intervallo di 5 minuti. È possibile inoltre calcolare il rilassamento specifico ad ogni istante t , moltiplicando il termine adimensionale di cui sopra, per un'ampiezza, funzione quest'ultima della maturità.

Operativamente parlando per la prova MC015 sono stati ricavati i grafici sotto riportati. Per chiarezza si elencheranno tutti gli step eseguiti durante la manipolazione dei dati sperimentali:

1. Per ogni ciclo, si è isolato l'intervallo di tempo e i valori relativi allo sforzo, ottenuti nella parte di ciclo inerente al rilassamento. (Tramite le acquisizioni fatte con TESTWARE SX si sono ricavate le variazioni delle forze, per ogni ciclo, in kN; si sono divise quindi per la superficie del provino per avere gli sforzi in MPa.).

Si è dunque costruita un'unica scala temporale, in quanto la medesima per ogni ciclo: il rilevamento della variazione degli sforzi relativa al rilassamento avviene con intervallo regolare. Si sono inoltre scalate tutte le curve relative al rilassamento, rispetto al primo valore di sforzo σ_0 (quello rilevato all'istante t_0) facendo così in modo che tutte avessero l'origine in comune (0;0)

Il grafico ottenuto è:

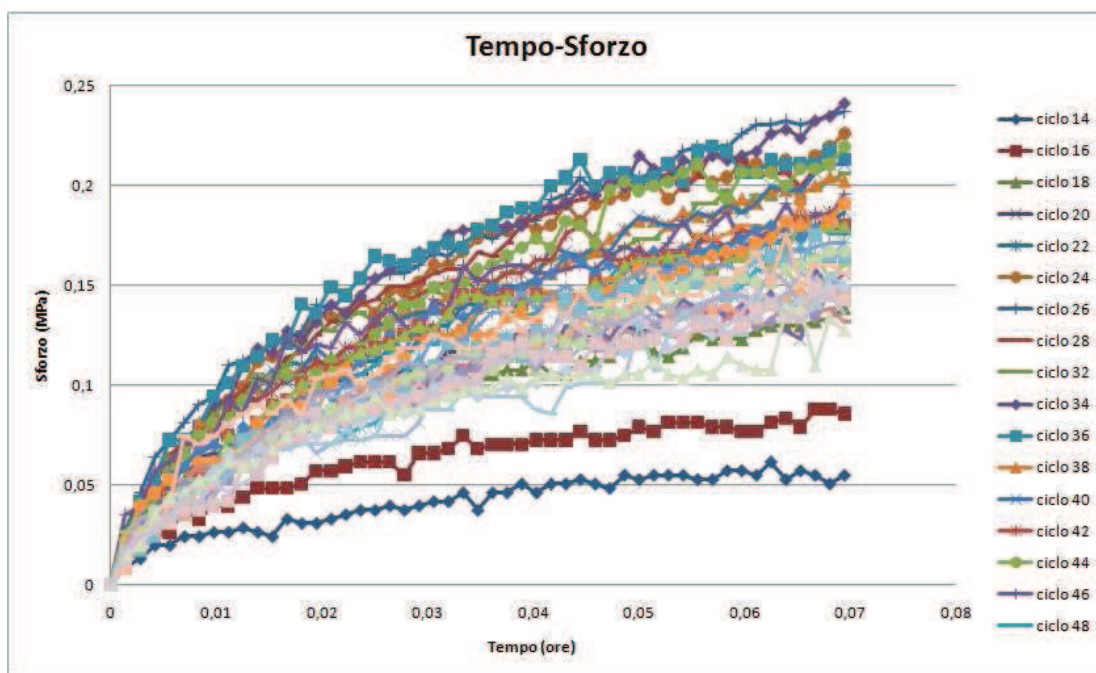


Figura 15.4

Nel grafico precedente, quindi, sono rappresentati tutti i cicli effettuati nella prova MC015, ad esclusione di quelli registrati prima della presa del materiale.

Ci sono 48 curve che rappresentano la variazione dello sforzo in funzione del tempo. Si è scelto infatti di analizzare la metà dei cicli registrati, per ragioni di tempo.

Nella legenda, per problemi di spazio, si sono indicati solo i primi 48 cicli (17 curve), le curve rappresentate sono però 48.

Come si può osservare dall'immagine, le ampiezza delle curve rappresentanti le variazioni degli sforzi, non risultino ordinate, nel senso che non si constata che, come per il fluage, con l'aumentare del tempo la variazione di sforzo è sempre minore.

Sembra che, fino ad un'età del calcestruzzo di 11ore, le curve non siano disposte secondo un ordine. Ma per avere la certezza di quanto detto si dovrà analizzare quelle che sono definiti Rilassamento specifico e Ampiezza di rilassamento (a 5 minuti).

2. Per poter quindi confrontare realmente i risultati ottenuti, si divide ciascuna curva di rilassamento per la deformazione reale che si ha in ogni ciclo (rilassamento specifico). Visto l'entità delle deformazioni calcolate in μdef , per

rendere più significativi i valori riportati nel grafico, si opta per un rilassamento specifico valutato in MPa/def

Il risultato è riportato nel grafico seguente:

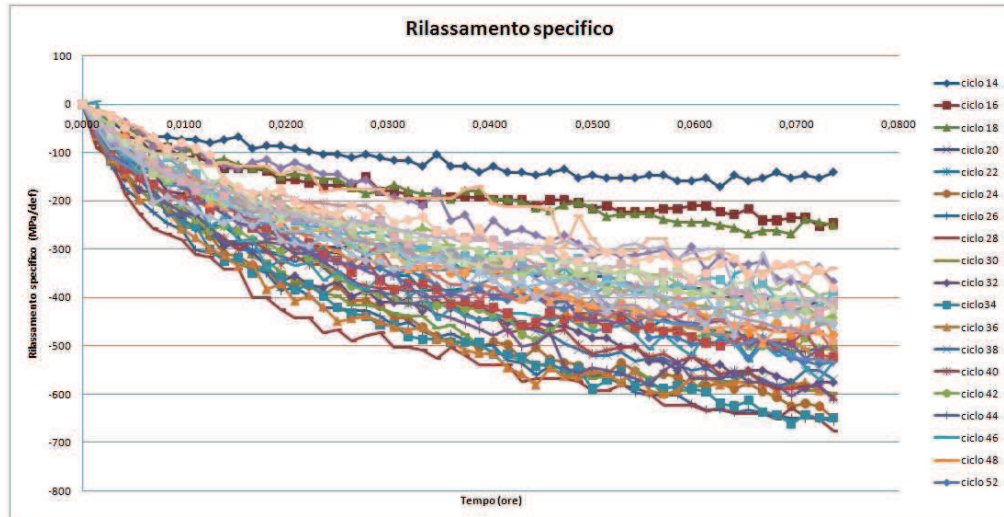


Figura 15.5

Come si vede dal grafico, nonostante si siano divisi tutti gli sforzi appartenenti a ciascun ciclo per la propria deformazione, l'andamento e soprattutto l'ordine delle curve non è cambiato. Per trarre delle conclusioni si aspetta di vedere l'andamento dell'Ampiezza di rilassamento a 5 minuti.

3. il passo successivo è stato dunque quello di normalizzare tutte le curve di sforzo ottenute, dividendole per il valore dell'ultimo sforzo ciascuna curva. (t_{5i}) In questo modo si ottengono delle curve normalizzate, con origine in 0 ed ordinata massima 1.

Il grafico ottenuto è:

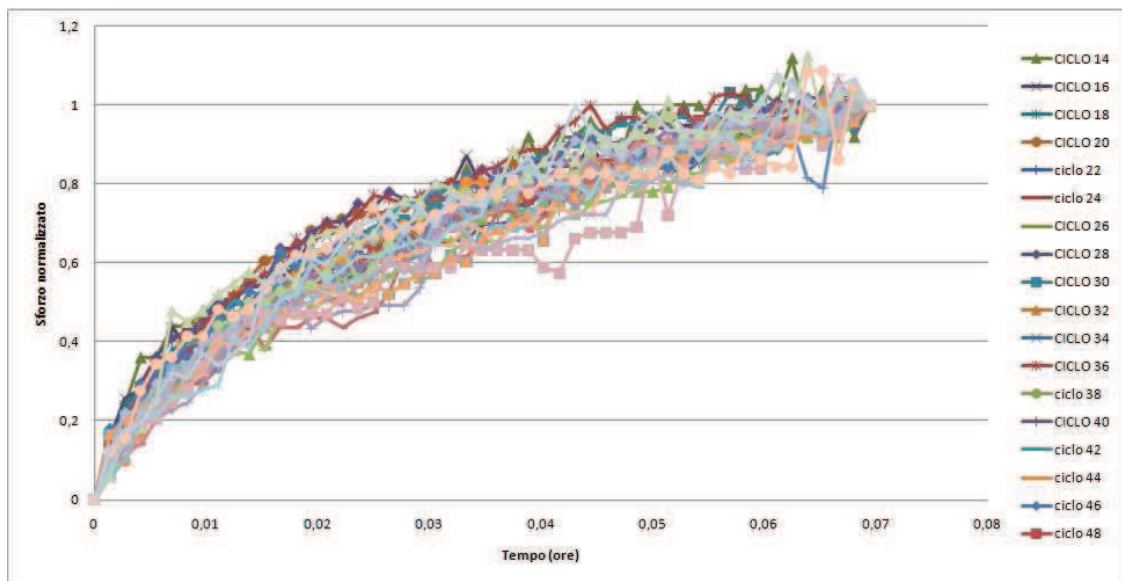


Figura 15.6

È interessante vedere come ora tutti i cicli siano ridotti ad avere praticamente la stessa curva che descrive il loro rilassamento. Infatti qualora si trovasse una curva media di quelle rappresentate nel grafico precedente, basterebbe cambiarne l'ampiezza per poter descrivere il rilassamento relativo a ciascun ciclo.

4. Si è quindi proceduto su questa linea, tracciando la curva media:

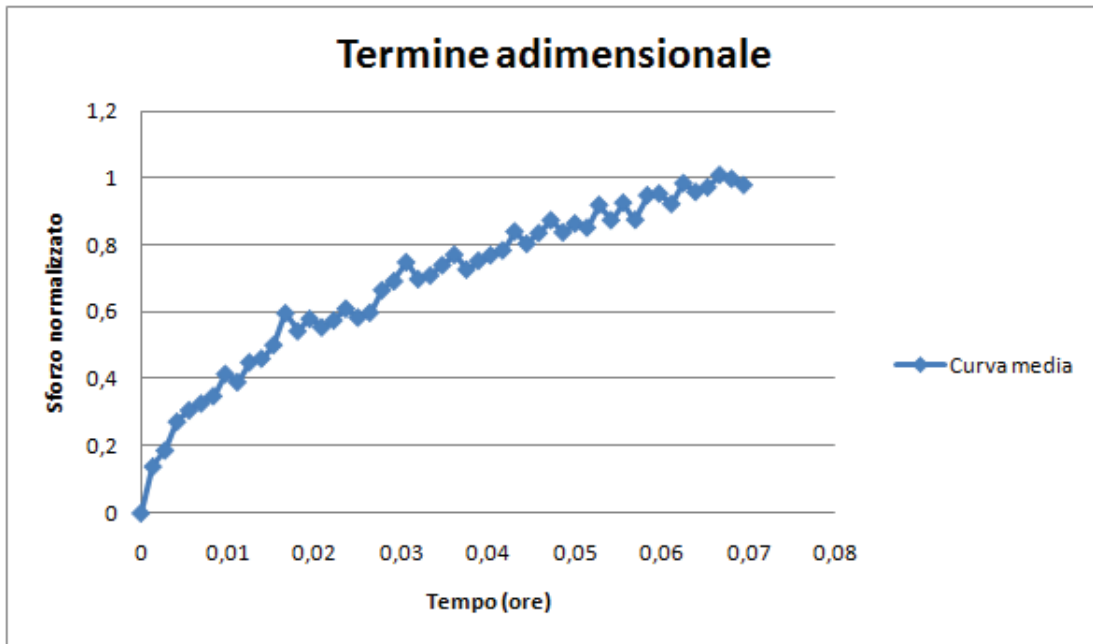


Figura 15.7

Per quanto riguarda quindi l'ampiezza, il grafico successivo ne descrive l'andamento. Si ricorda che questa è stata calcolata considerando i valori di rilassamento specifico (rapporto tra sforzo e deformazione) , a 5 minuti.

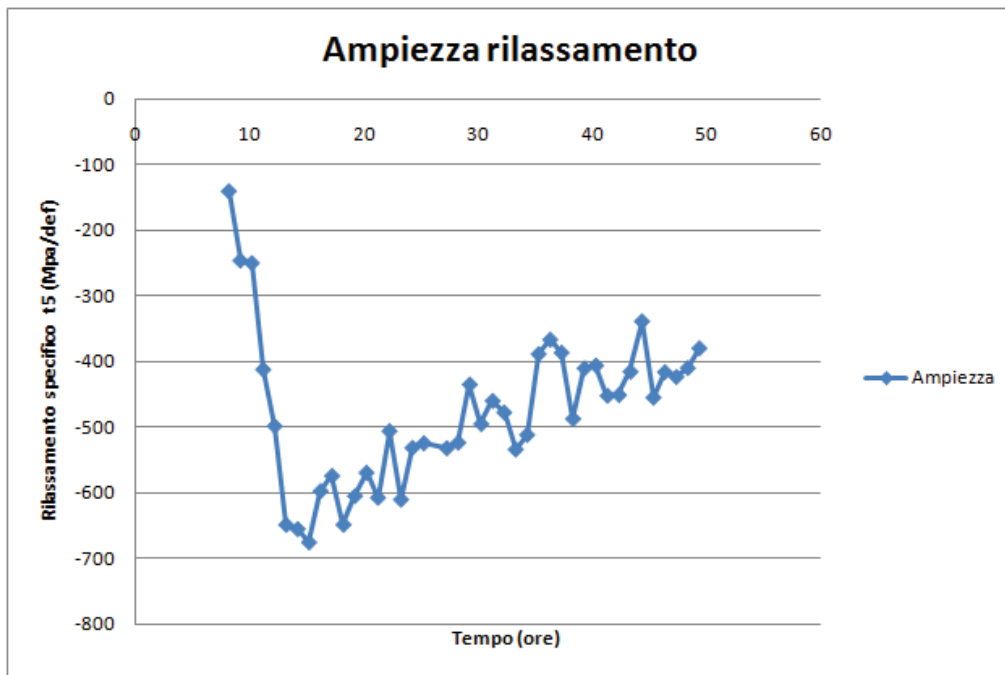


Figura 15.8

Come si vede dalla figura precedente, anche la funzione ampiezza conferma ciò che già è stato detto precedentemente: nelle prime ore dopo il getto, l'ampiezza cresce (fino a circa 11 ore) per poi successivamente diminuire. Sembrerebbe che per un calcestruzzo giovane, la funzione rilassamento non può essere considerata come funzione duale del fluage.

Si potrebbe cercare una funzione Ampiezza di rilassamento a partire da 11 ore dal getto, nel caso in esame, per poi proseguire con un ragionamento analogo a quello fatto per il fluage.

Prima di trarre comunque conclusioni di natura generale, e quindi applicabili a qualsiasi caso di studio, è necessario ripetere la prova e verificare la bontà dei risultati ottenuti.

È importante comunque notare come si possano descrivere fluage e rilassamento con un unico termine adimensionale.

Mettendo a confronto infatti le due curve medie ottenute da fluage e rilassamento normalizzati, si ha che:

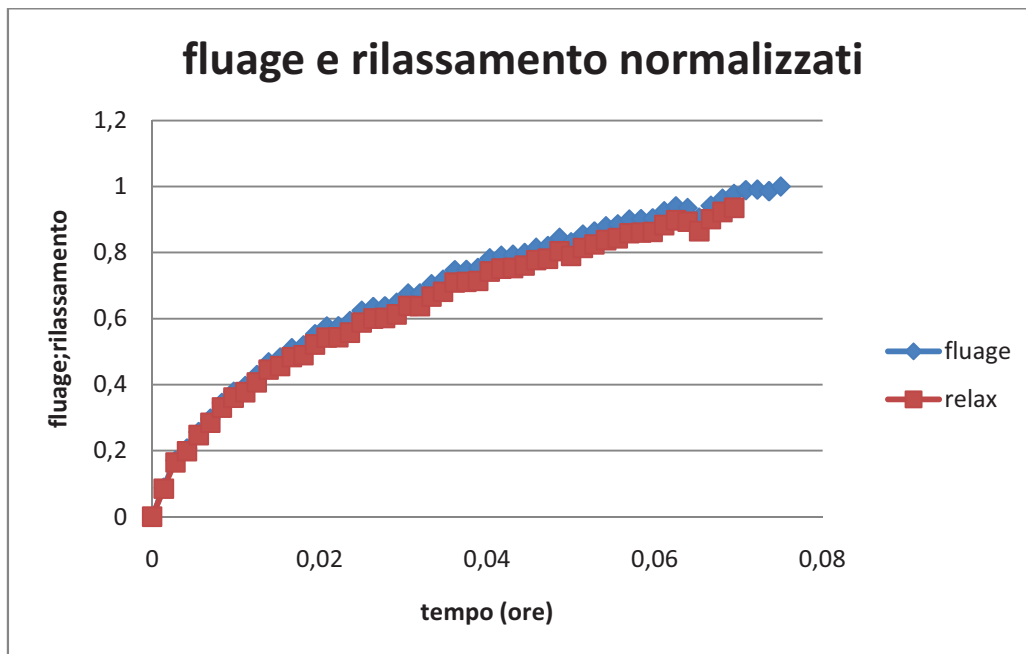


Figura 15.9

Come si può notare chiaramente dal grafico proposto, le due curve caratterizzanti fluage e rilassamento sono sovrapposte. Di conseguenza l'espressione del termine adimensionale che le descrive è la stessa: la forma simile all'espressione di Dirichlet utilizzata nel fluage è valida anche per il rilassamento.

Ciò che differenzia, secondo questa modellizzazione, i due fenomeni sta tutto nel termine Ampiezza, già descritta per il fluage.

Come si è già detto però, per quanto riguarda il rilassamento, è necessario prima validare i risultati ottenuti nella prova MC015 prima di poter trovare un'espressione per descrivere l'ampiezza di rilassamento stessa.

3.2.6 Monitoraggio del coefficiente di Poisson MC016

PROVA MC016

Note prese al momento della prova:

- Giorno della prova: 20/01/2011 9:26:00 (getto)
- Inizio delle misure: 17:59:00
- Condizioni di prova: Tacqua costante a 20°C; Tambiente costante a 20°C.
- Scopo della prova: monitoraggio del coefficiente di Poisson in un calcestruzzo giovane

In questa prova si è cercato di misurare l'andamento del coefficiente di Poisson, con il trascorrere del tempo e quindi con l'aumentare del grado di maturità del calcestruzzo.

Il materiale su cui è stata effettuata la prova è il calcestruzzo utilizzato in tutto il corso dello stage.

È quindi stato gettato in una forma cilindrica in cartone di 22cm d'altezza e 11cm di diametro.

Per dare inizio alla prova si è dovuto attendere che il calcestruzzo facesse presa, per poterlo estrarre dal cilindro stesso. La difficoltà della prova sta nel misurare questo coefficiente in un materiale il cui passaggio da stato liquido a solido, è avvenuto pochi istanti prima e la cui consolidazione è ancora in corso. La prova è infatti iniziata a circa 8 ore dal contatto acqua-cemento e si è protratta fino a un'età del calcestruzzo di 48 ore. Per realizzare la prova ci si è serviti della pressa già utilizzata per la realizzazione delle prove di fluage e rilassamento. Un ciclo è quindi stato programmato come riportato in figura sottostante.

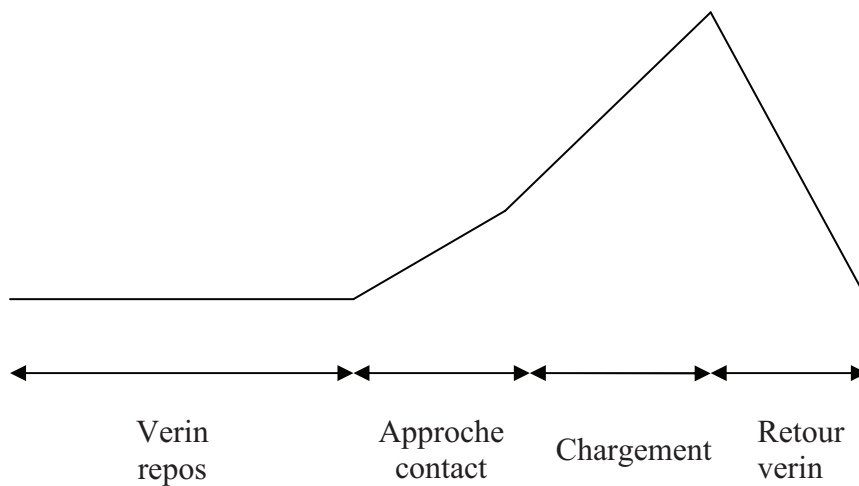


Figura 16.1

Le fasi del ciclo che sono state dunque realizzate sono:

- Verin repose: fase a carico nullo
- Approche contact: fase che dura 10 secondi; porta al contatto dell'LVDT della pressa con il provino
- Chargement: fase che dura 70 secondi e implica uno spostamento imposto $350\mu\text{def}$.
- Retour verin : ritorno del pistone in fase iniziale

I dati ricavati dal programma per ciascun ciclo sono stati: Tempo (sec), Forza (kN), spostamento del sensore di contatto della pressa (LVDT mm), lo spostamento longitudinale dei sensori posti sul provino (J2P long μdef), lo spostamento trasversale dei sensori posti sul provino (J2P trans μdef), la temperatura dell'apparecchio sui cui sono posti i captori di spostamento ($^{\circ}\text{C}$), e la temperatura al cuore del provino ($^{\circ}\text{C}$).

Per quanto riguarda le misure che vengono prese sulla superficie laterale del provino, sono state effettuate per mezzo dell'estensimetro J2P, descritto già in precedenza..

Per meglio comprendere i risultati che si presenteranno tra poco, è bene ricordare come il coefficiente di Poisson, spesso identificato con ν , corrisponde al rapporto tra

deformazione trasversale e deformazione longitudinale, nel segmento di carico (la pendenza della curva tracciata in ciascun ciclo di carico, permette di ottenere il valore). In letteratura, [De Schutter et al.,1996] è possibile trovare dei valori rappresentativi di questo coefficiente, che diminuiscono in funzione del tempo e che vanno da un valore di 0,5 per il calcestruzzo appena gettato, a un valore che si stabilizza intorno a 0,2 abbondantemente dopo la presa.

I risultati ottenuti nel nostro caso sono riportati nel grafico sottostante:

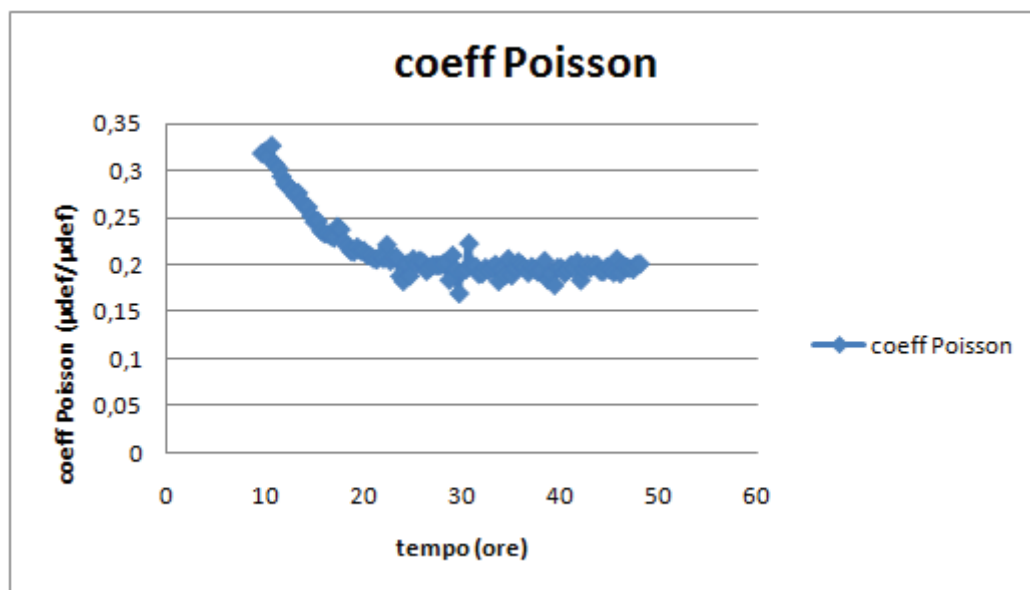


Figura 16.2

Nel grafico precedente, si sono quindi riportati sull'asse delle ascisse i valori di tempo medi per ciascun ciclo.

Come si può vedere dal grafico, si ha un valore assoluto di 0,35 al momento della presa e una stabilizzazione del coefficiente ad un valor di 0,2 in corrispondenza ad un tempo di 25 ore.

Si riporta in seguito l'andamento del coefficiente di Poisson in funzione del grado di idratazione (figura 6.3)

Come per il grafico precedente, si vede che il tempo di idratazione per cui si stabilizza il valore del coefficiente di Poisson è 0,5 (grado di idratazione 0,5 o grado di avanzamento 0,6). Dopo questo istante, il coefficiente non evolve più in maniera notevole, fino a 2 giorni (fine del monitoraggio).

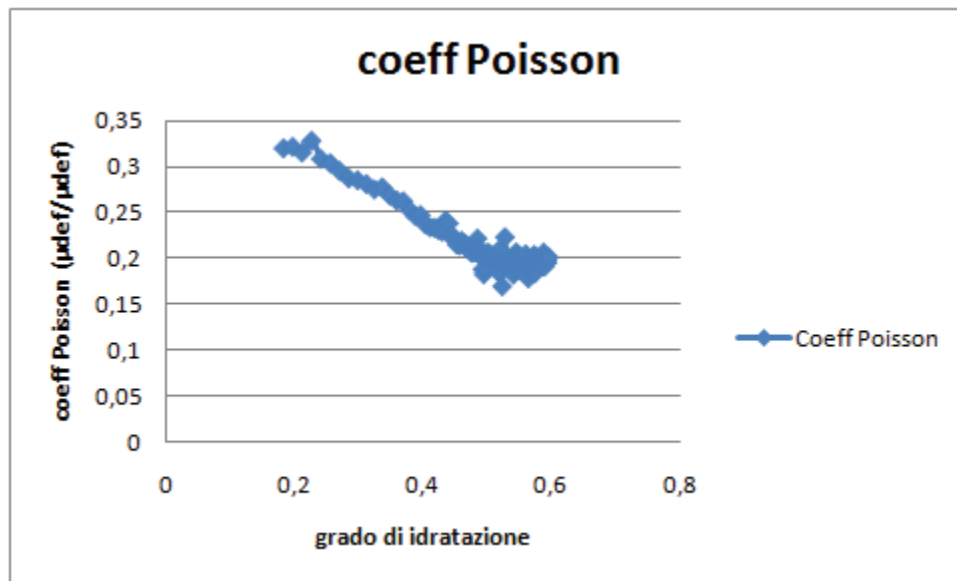


Figura 16.3

La modellizzazione sembra semplice, in funzione del grado di idratazione. Si può considerare che la legge di evoluzione dopo la presa, sia una retta, fino a $\xi(\text{teq})=0,5$ e che sia costante in seguito.

L'equazione della retta che interpola il valore del coefficiente in funzione del grado di idratazione, è: $y=0,42x-0,41$.

Grazie a questa equazione si può trovare il valore del coefficiente di Poisson per un tempo di 7 ore, avendo considerato un valore del coefficiente in questione di 0,5 per il momento del getto. A 7 ore quindi il coefficiente di Poisson risulta -0,375.

Per $0,083 < \xi(t_{eq}) < 0,5$ si ha : $v(\xi) = 0,42 \xi(t_{eq}) - 0,41$

Per $0,5 < \xi(t_{eq}) < 0,6$, si ha : $v = 0,2$

Si possono tracciare quindi i grafici seguenti, in funzione di tempo reale e grado di idratazione:

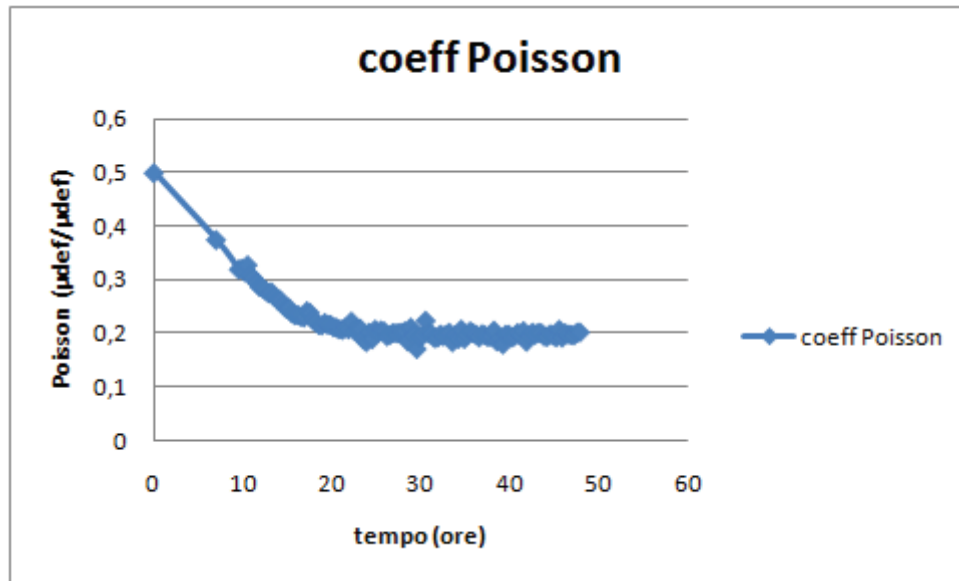


Figura 16.4

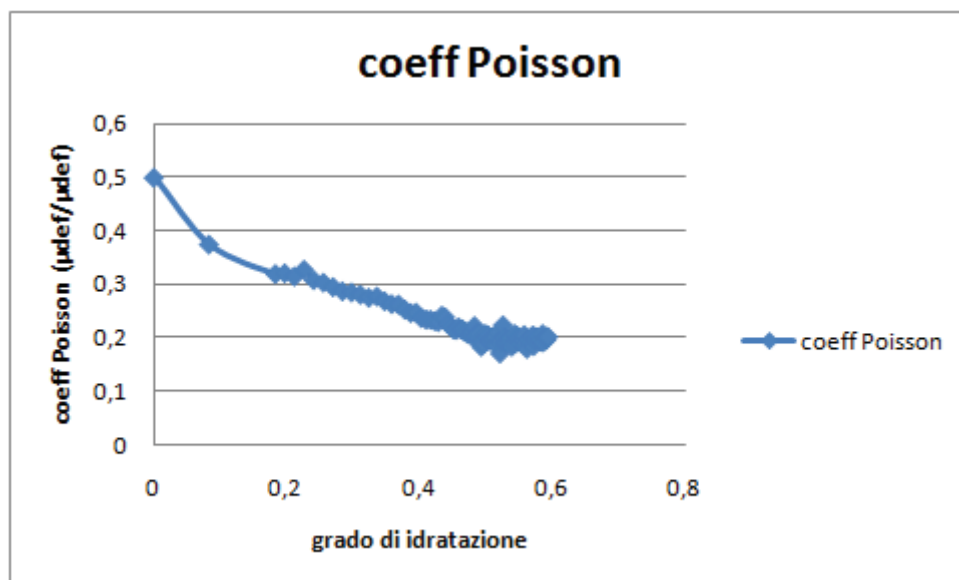


Figura 16.5

Si osserva che per questo calcestruzzo il coefficiente di Poisson continua ad evolvere anche dopo il momento della presa, mentre il CDT diviene circa costante al momento della presa.

3.2.7 Comparazione dell'evoluzione del modulo di elasticità E per tutte le prove realizzate con BTJASPE

Le curve del modulo di elasticità ottenute dalle prove precedenti (MC014, MC015, MC016) sono messe in relazione a quelle che erano state precedentemente realizzate con BTJASPE.

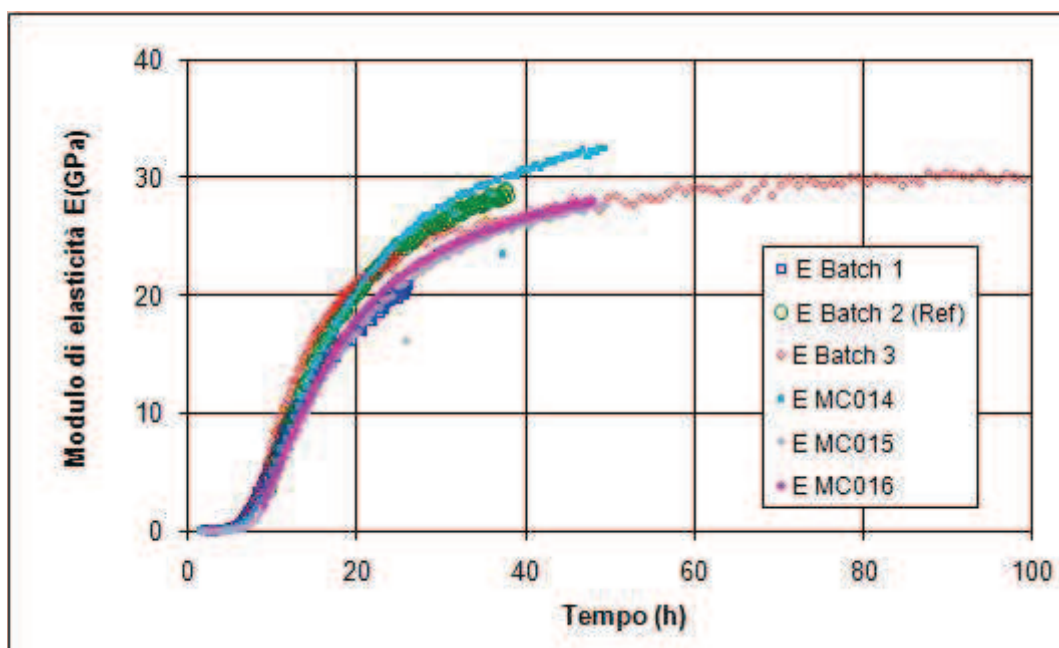


Figura E.1

Durante le prime prove (Batch 1, Batch 2, Batch 3) sono state imposte delle deformazioni pari a $100\mu\text{def}$, molto più piccole di quelle utilizzate per la prove MC014, MC015, MC016 ($350\mu\text{def}$).

Malgrado questa differenza riguardante la sollecitazione, le evoluzioni dei moduli d'elasticità sono comparabili. Si può quindi dedurre che, all'interno di questa gamma di sollecitazioni, i provini non subiscono dei danneggiamenti differenti.

Dal grafico precedente si può anche vedere come si abbia un buon raggruppamento delle curve, all'inizio della prova. Ciò implica delle buone performance a livello del rilevamento dei dati al momento della presa.

I valori ottenuti con BTJASPE sono confermati dai moduli ricavati dalle prove in cui si è utilizzato l'estensimetro J2P (Batch 2 e MC016), in cui il calcestruzzo è stato gettato in cilindri in cartone. La dispersione dei risultati è senza dubbio dovuta al fatto che il materiale è stato gettato manualmente e quindi presenta delle differenze di fabbricazione.

Si riporta in seguito il grafico ottenuto esprimendo il modulo di elasticità E in funzione del grado di idratazione ξ .

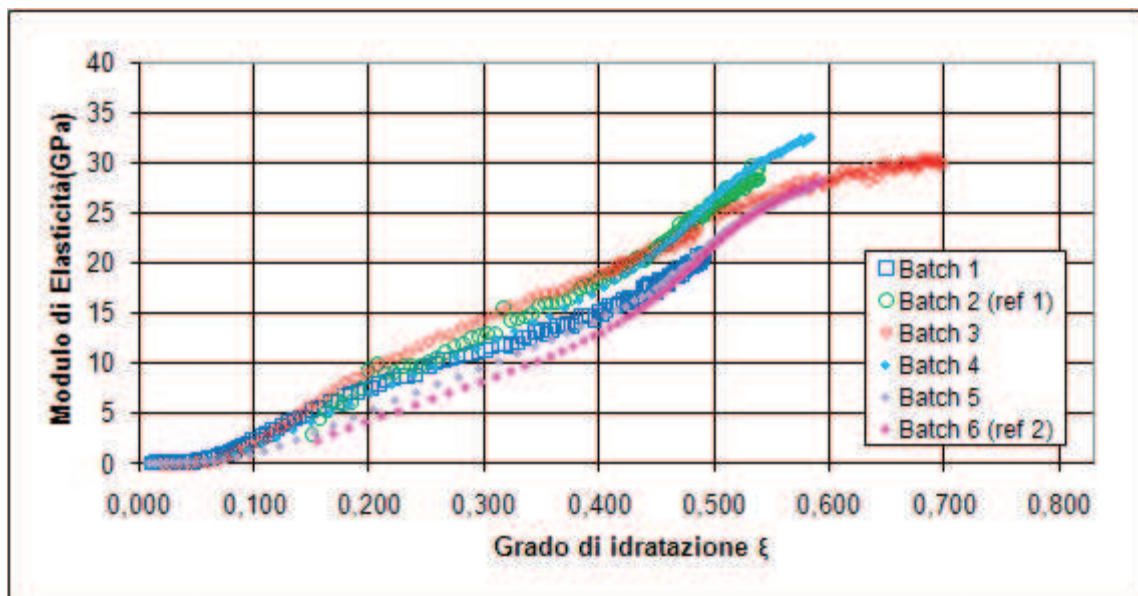


Figura E.2

Si può dire che a grandi linee il modulo elastico è proporzionale al grado di idratazioni (retta) dopo il momento della presa (è praticamente una retta).

4. Conclusioni

La conoscenza dell'evoluzione dei parametri di un calcestruzzo giovane, è di reale e fondamentale importanza per una corretta stima del rischio di fessurazione. Un approccio di tipo sperimentale è necessario quanto uno numerico. Questo stage aveva come scopo quello di acquisire una conoscenza approfondita sia sullo sviluppo della struttura del calcestruzzo giovane, sia sull'evoluzione dei parametri fondamentali per la sua descrizione. Un dispositivo, posseduto LCPC, ha permesso in passato il monitoraggio dell'evoluzione della rigidità del calcestruzzo e durante lo stage si sono esplorate altre possibilità, per il monitoraggio di altri parametri.

In un primo tempo, sono stati indagati e quantificati gli aspetti relativi ai parametri che apportano un'influenza sulle misure di spostamento. Si ha che le variazioni di temperatura dell'acqua utilizzata come fluido evacuatore di calore in BTJASPE, e della temperatura ambiente abbiamo la stessa influenza sulle misure di spostamento. Questa influenza è perfettamente presa in conto se si misura, con una sonda di platino posta su una delle colonne di BTJASPE, la temperatura.

La correzione effettuata durante il trattamento dei dati, consiste nel ricalcolare, a spostamento misurato, uno spostamento uguale alla variazione della temperatura della colonna, moltiplicata per un coefficiente di sensibilità ($-2,26\mu\text{m}/^\circ\text{C}$), determinato nelle prime prove.

In vista dell'utilizzo di BTJASPE per determinare il CDT sono state fatte una caratterizzazione del tempo di risposta del macchinario, una modellizzazione termico-numerica per caratterizzare i gradienti di temperatura, e delle prove per testare le sollecitazioni termiche sinusoidali che sarebbero state applicate.

Ne è risultato un protocollo di prova basato su delle sollecitazioni termiche sinusoidali ($A=2^{\circ}\text{C}$ e $T=1\text{h}$) e un trattamento dei dati che ha permesso un monitoraggio continuo del coefficiente.

Il valore del CDT diminuisce in un primo tempo, per poi divenire praticamente costante, come si trova in letteratura.

Sono state inoltre eseguite delle prove riguardanti l'evolvere del modulo di elasticità. Sono state comparate con quelle precedentemente realizzate e con delle prove meccaniche più classiche, su dei provini che sono stati tolti dalla forma subito dopo la presa. Il dispositivo permette quindi un monitoraggio del modulo più che soddisfacente.

In parallelo all'utilizzo di questo dispositivo per seguire l'evolversi del modulo di elasticità, è stata realizzata una prova relativa al coefficiente di Poisson. Questo è risultato avere un andamento decrescente nel periodo che va dalla presa a circa 25 ore di vita del provino, per poi stabilizzarsi ed avere andamento costante. Questa evoluzione è pressoché lineare in funzione del grado di idratazione.

Infine sono realizzate delle prove per caratterizzare fluage e rilassamento del calcestruzzo giovane. È stato realizzato un protocollo di prova che consiste nel caricare, in maniera ciclica, il materiale, per un tempo di 24 e 48 ore. Un ciclo comporta un segmento a carico nullo, di durata 25 minuti circa, succeduto da un carico a sforzo o deformazione costante di durata 5 minuti. Il fluage è stato modellizzato con una funzione matematica (Dirichlet), indipendente dal tempo del calcestruzzo, che, moltiplicata per un termine di Ampiezza funzione del tempo o del grado di idratazione, permette di trovare ogni ciclo effettuato. Il rilassamento, in un calcestruzzo giovane, sembra non possa essere descritto attraverso una funzione duale a quella che descrive il

fluage, per quanto riguarda l'ampiezza come invece accade nel calcestruzzo maturo. Si ha invece che il termine adimensionale utilizzato per descrivere fluage e rilassamento, è identico per i due fenomeni.

4.1 Prospettive

Durante le prove, è stata effettuata una modellizzazione numerica per caratterizzare i gradienti termici nel provino, ma sarebbe conveniente caratterizzare tramite un altro modello, i campi di sforzo derivanti da questi gradienti. In effetti bisognerebbe verificare che l'entità di questi gradienti sia accettabile.

Per la conferma dei risultati ottenuti, inerenti al CDT, dovrebbero essere effettuate altre prove, sia sul calcestruzzo utilizzato in questo studio, sia su altri caratterizzati da differente composizione.

Il monitoraggio del modulo di elasticità dovrebbe essere ripetuto con lo scopo di ridurre la dispersione dei dati. Bisogna prestare molta attenzione alla fabbricazione del materiale (impasto automatizzato su quantità importanti per avere omogeneità di materiale, stesso lotto di cemento..)

La deformazione imposta è forse un po' eccessiva, e quindi sarebbe meglio conoscere la resistenza del materiale ancora giovane, prima di realizzare le prove sul monitoraggio della rigidità. Per avere un andamento più completo dello sviluppo del modulo di elasticità, inoltre, sarebbe altresì opportuno allungare i cicli e la registrazione dei dati ad una settimana, diradando i cicli dopo le 24 ore.

L'imposizione di deformazione a fluage in linea di massima, può essere applicato solo dopo la presa. In generale bisognerebbe lasciare il materiale a riposo prima dell'inizio della prova ciclica. Si può immaginare di effettuare una prima prova per conoscere il materiale, prova realizzata come i primi monitoraggi dell'andamento della rigidità.

In seguito si possono lanciare delle prove relative al fluage vero e proprio, con inizio dopo la presa. Questo protocollo sarà meno vincolante per il calcestruzzo stesso. In ogni caso, bisogna ripetere le prove di fluage e rilassamento sul calcestruzzo in esame. È necessario inoltre completare la modellizzazione ed investigare sul dualismo esistente tra fluage e rilassamento.

Infine, si è visto, che è possibile determinare l'energia di attivazione del calcestruzzo con due prove calorimetriche. BTJASPE permette di realizzare perfettamente questa determinazione. Sarà sufficiente realizzare due monitoraggi del modulo a temperature costanti differenti. Questa prova verrà sicuramente svolta in futuro.

Bibliografia

- ACKER ,P. , MICHAUD-POUPARDIN V.(2002) *Limiter la fissuration: conditions indispensables à la durabilité des structures en béton*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussée 238, REF.4433
- AITCIN ,PC., NEVILLE A, ACKER P (1998) *Les différents types de retrait di béton-* Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussée 215, REF.4184
- BAZANT, Z.P., BAWEJA, S., (1995) *Creep and shrinkage prediction model for analysis of design of concrete structures - model B3*, Materials and Structures,
- BENTUR A. (2002) *Early age cracking in cementitious systems*, edited by RILEM
- BISSONNETTE, B and M. Pigeon (1995). *Tensile creep at early age of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes*. Cement and Concrete Research 25 (5), 1075-1085
- BOULAY C, COLSON A, (1979), *Un extensomètre à béton éliminant l'influence des déformations transversales sur la mesure des déformations longitudinales*, Matériaux et Constructions, janvier, Vol. 14, n° 79, 35-38.
- BOULAY,(2002) *Project de procédure étallonage des LVDT* , Rapport interne LCPC,Qualité BCC1, 01-00-001
- BOULAY, C. (2003) *Determination of coefficient of thermal expansion, in Early age cracking in cementitious systems*, State-of-the-Art Report Number 25, prepared by Rilem Technical Committee 181, Editor A. Bentur, RILEM
- BOULAY, C. (2005) *Réponse thermique d'un capteur de température ou d'un objet quelconque*, LCPC
- BOULAY, C., MERLIOT E., STAQUET S., MARZOUK O., (2010) *Monitoring of the concrete setting with an automatic method*, Structural fault and repairs, Edimbourg
- BOULAY, C., TORRENTI J.M., ANDRE J.L., SAINTILAN R., (2010) *Calorimétrie quasi adiabatique pour bétons: facteurs d'influence*-Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussée 278
- BRESSON,J. (1982), *La prévision des résistances des produits en béton*, Colloque International sur la béton jeune- ENPC, Paris 6-7 Avril 1982, Vol.1, pp. 115
- CHARRON J-P.(2003) *Contribution à l'étude du comportement au jeune âge des matériaux cimentaires en conditions de déformations libre et restreinte*, Thèse
- CUSSON, D., HOOGEVEEN, T.J. (2006) *Measuring early-age coefficient of thermal expansion in high-performance concrete*-International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Lyngby, Denmark

DE SCHUTTER,G., TAERWE L., (1996), *Degree of hydration-based description of mechanical properties of early age concrete*, Materials and Structures, Vol. 29, July pp335-344

EMBORG,M.(1989) *Stresses in concrete structures at early ages*, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Division of Structural Engineering, Sweden

GANGER L.(1996) *Comportement différé du béton dans le enceintes de centrales nucléaires- Analyse er modélisation*, LCPC

GARCIA BOIVIN S (2001), *Retrait au jeune âge du béton* , LCPC

GUÉNOT-DELAHAIE, I., (1997) *Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton*, Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris

HANSEN, T.C., (1960) *Creep of concrete*, Matériaux et Constructions, Vol. 19, n° 114, pp.423-436.

HANSEN, P., PEDERSEN E.J., (1977), *Maturity Computer for controlling curing and hardening of concrete*, Nordisk Betong, V.1, No.19,pp. 21-25

KOVLER (1995), *Shock of evaporative cooling of concrete in hot dry climates- Concrete International*, V. 17, No. 10, pp. 65-69

LAPLANTE, P., BOULAY, C. (1994) : *Évolution du coefficient de dilatation thermique du béton en fonction de sa maturité aux tout premiers âges*, Materials and Structures, Vol. 27, 596-605.

LEA, F.M., LEE, C.R., (1946) *Shrinkage and creep in concrete*, Symposium on the shrinkage and cracking of cementive materials, The Society of Chemical Industry, London

LOSER, R., DI BELLA C., MUNCH B., LURA P., (2010), *Measuring the coefficient of thermal expansion of cement paste at early age* –Cement and concrete Research 40(2010) 1138-1147

MINDESS, S., YOUNG, J.F., (1981) *Concrete*, Prentice-Hall inc., Englewood Cliffs, New jersey

MITCHELL,D., KHAN A.A., COOK W.D.,(1998) *Early age properties for thermal and stress analyses during hydratation*, Material science of concrete V, The American Ceramic Society, 265-305

NEVILLE, A.M., (1970) *Mechanism of concrete* North-Holand Publishing Company, Amsterdam

PINTO, R.C.A., IRRIGARAY M.A.P, CERQUEIRA R.,(2010) *The development of ultrasound pulse velocity in early ages for concrete, mortar and cement pastes*, Federal University of Santa Catarina- Structural fault and repairs, Edimbourg

POWERS, T.C., BROWNYARDS, T.L., (1948) *Studies of the physical properties of hardened cement paste*, Research Laboratories of the Portland Cement Association, Bulletin 22, Chicago.

REY,M.,(2004) *Developpement d'un essai d'effacement de contrainte sur éprouvettes de béton* Rapport de stage LCPC

RUBEYST N., GRUYAERT E., GROSSE C.U., DE BELIE N., (2008) *Monitoring the setting of concrete containing blast-furnace slag by measuring the ultrasonic p-wave velocity*, Cement and Concrete Research 38, pp1169-1176

SELLEVOLD, E.J., JUSTNES, H., (1992) *High strength concrete binders, Part B : Non evaporable water, self-desiccation and porosity of cement pastes with and without condensed silica fume*, Proceedings of the Fourth Canmet/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turkey

SEED, H.B., (1948) *Creep and shrinkage in reinforced concrete structures*, Reinforced Concrete Review

SELLEVOLD,E.J., BJONTEGAARD O.,(2001) *Interaction between thermal dilatation and autogenous deformation in HPC-* Materials and Structures (2006) 34:226–272

SELLEVOLD,E.J., BJONTEGAARD O.,(2006) *Coefficient of thermal expansion of cement paste and concrete: Mechanisms of moisture interaction-* Materials and Structures (2006) 39:809–815

THOMAS, F.G., (1937) *Creep of concrete under load*, International Association of Testing Materials, London

WITTMANN, F.H., (1982) *Creep and shrinkage mechanisms*, Creep and shrinkage in concrete Structures

WITTMANN,F., LUCKAS J.,(1974) *Experimental study of thermal expansion of hardened cement paste-*Materials and Structures,No 40,247-252

APPENDICE

Modelli reologici

Un modello reologico permette di legare sforzi, deformazione e i loro derivati, e quindi di caratterizzare il comportamento dei materiali.

Gli elementi di base che costituiscono il modello reologico in grado di descrivere il comportamento di un materiale visco-elastico, come il calcestruzzo, sono due: la molla e il dissipatore viscoso.

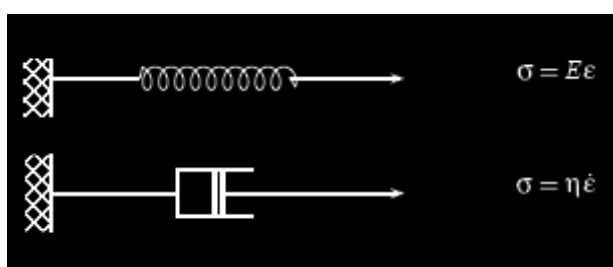


Figura A.1

Si analizzano quindi questi due elementi base, dalla cui combinazione nascono modelli più complessi che verranno visti in seguito:

La molla:

descrive il comportamento di un corpo caratterizzato da un'elasticità lineare perfetta: la deformazione è totalmente reversibile dopo la fase di scarico; la sua relazione costitutiva è la Legge di Hooke:

$$F = k \times \delta$$

dove :

F indica la forza

k indica la costante elastica

δ indica lo spostamento

E quindi: la deformazione subita da un corpo elastico è direttamente proporzionale alla forza applicata tramite una costante di proporzionalità, detta costante elastica.

Solitamente in termini ingegneristici si ha una rappresentazione della legge di Hooke tramite i concetti di sforzi e deformazioni:

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

dove:

σ indica la tensione (Pa)

E indica il modulo di elasticità (Pa)

ε indica la deformazione (m/m)

Il dissipatore viscoso:

descrive il comportamento viscoso del materiale ed è regolato dalla legge di Newton:

$$\sigma = \eta \times \dot{\varepsilon}$$

dove:

σ indica la tensione (Pa)

η indica la viscosità (Pa•s)

$\dot{\varepsilon}$ indica la velocità di deformazione (m/m/s)

E quindi: esiste un legame diretto tra la tensione applicata e la velocità di deformazione; questa proporzionalità è data dalla viscosità.

Ci si discosta da un comportamento semplicemente Hookiano o semplicemente Newtoniano quando ad esempio, la tensione dipende sia dalla deformazione che dalla velocità di deformazione. È questo il caso in cui il materiale presenta un comportamento visco-elastico.

In questo caso la relazione più semplice che può descrivere questo comportamento è di tipo lineare:

$$\sigma = \sigma_E + \sigma_V = E \times \varepsilon + \eta \times \dot{\varepsilon}$$

Descritte dunque le cellule base per la composizione di modelli più complessi, ci si appresta alla descrizioni dei tre modelli elementari più comunemente usati per la descrizione del comportamento dei materiali.

Dall'utilizzo di più cellule base e dalla loro messa in serie o in parallelo, infatti, si creano i tre modelli che sono successivamente rappresentati:

a- Modello di Voigt

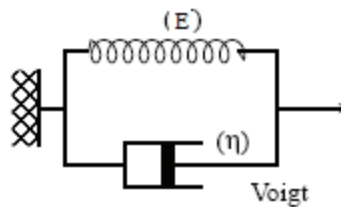


Figura A.2

Come si vede dalla figura su riportata, il modello di Voigt è costituito da una molla ed un dissipatore viscoso, posti in parallelo.

Le equazioni che regolano questo modello sono:

$$\sigma(t) = \sigma(t)_E + \sigma(t)_\eta$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t)_E = \varepsilon(t)_\eta$$

Da cui l'equazione differenziale:

$$\sigma(t) = E \times \varepsilon(t) + \eta \times \dot{\varepsilon}(t)$$

Questo modello non permettere la rappresentazione dell'elasticità istantanea qualsiasi sia la sollecitazione applicata alla cellula. Il termine proporzionale alla velocità di deformazione tende ad infinito quando è applicata per esempio, una sollecitazione con deformazione istantanea. Per una deformazione infinitamente lenta imposta al dissipatore viscoso, infatti, si avranno degli sforzi pressoché nulli. Se la deformazione è invece istantanea gli sforzi tenderanno ad infinito (le σ dell'espressione sopra tendono ad infinito se $\dot{\epsilon}$ tende ad infinito $t=0$). Questo modello quindi non è in grado di rappresentare una prova di rilassamento (perché impongo una def istantanea!).

(Per risolvere questo problema, una molla in serie è aggiunta alla cellula di Voigt come verrà in seguito illustrato).

L'insieme quindi delle due molle e del dissipatore viscoso porta al modello di Kelvin-Voigt che sarà visto in seguito.

b- Modello di Maxwell

È ottenuto ponendo in serie una molla e un dissipatore viscoso:

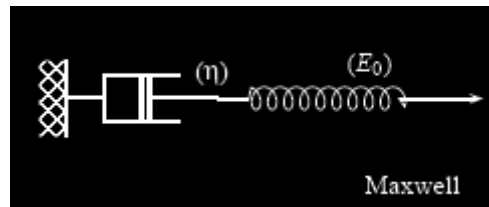


Figura A.3

Le equazioni che lo governano sono:

$$\sigma(t) = \sigma(t)_E = \sigma(t)_\eta$$

$$\dot{\epsilon}(t) = \dot{\epsilon}(t)_E + \dot{\epsilon}(t)_\eta$$

Da cui l'equazione differenziale:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E_0} + \frac{\sigma(t)}{\eta}$$

In questo modello l'applicazione di uno sforzo istantaneo si traduce in una deformazione istantanea. Ciò descrive perfettamente la realtà. Il dissipatore viscoso si comporta come un elemento a rigidità infinita. Lo schema equivalente alla cella di Maxwell nel caso dell'applicazione di uno sforzo istantaneo è limitato alla molla stessa. Ciò descrive bene la realtà del carico istantaneo. Invece nella fase in cui il carico è mantenuto costante, che segue la parte di carico istantaneo, la velocità di deformazione (fluage) è costante (figura x). Ciò non descrive correttamente la realtà.

Per quanto riguarda questi due primi modelli si può affermare che la risposta è ottenuta istantaneamente con la ricerca delle soluzioni delle due equazioni differenziali precedenti. Le espressioni che si risultanti sono rispettivamente:

-per il modello di Voigt

il fluage per una tensione σ_0 si traduce in: $\varepsilon(t) = \left(\frac{\sigma_0}{E}\right) \times (1 - \exp\left[-\frac{t}{\tau_1}\right])$

-per il modello di Maxwell:

il fluage per una tensione σ_0 si traduce in: $\varepsilon(t) = \left(\frac{\sigma_0}{E_0}\right) + \left(\frac{\sigma_0 \times t}{\eta}\right)$

e il rilassamento per la deformazione ε_0 si traduce in: $\sigma(t) = E_0 \times \varepsilon_0 \times \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]$

dove $\tau = \eta/E_0$ e $\tau_1 = \eta/E$

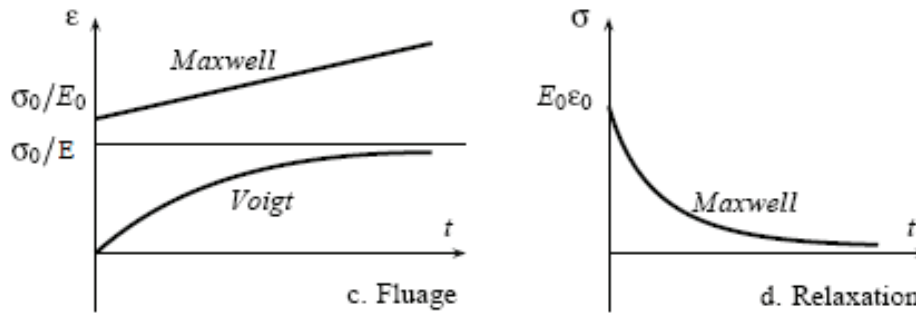


Figura A.4

Da questi grafici si osserva anche che il fluage della cellula di Voigt è asintotica. Il rilassamento del modello di Maxwell è totale (tende a 0).

c- Modello di Kelvin-Voigt

È un modello “composto” ottenuto con due molle e un dissipatore viscoso, disposti come in figura. Si ha quindi una cellula di Voigt con una molla in serie:

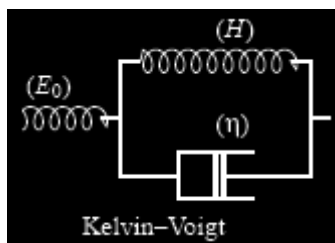


Figura A.5

Questo modello presenta le seguenti risposte per fluage e rilassamento:

il fluage per una tensione σ_0 si traduce in:

$$\varepsilon(t) = \left(\left(\frac{1}{E_0} + \frac{1}{H} \right) \times (1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right)) \right) \times \sigma_0$$

il rilassamento per la deformazione ε_0 si traduce in:

$$\sigma(t) = \left\{ \frac{H}{(H+E_0)} + \left[\frac{E_0}{(H+E_0)} \right] \times \exp\left[-\frac{t}{\tau_r}\right] \right\} E_0 \varepsilon_0$$

Dove τ_r e τ_f sono rispettivamente il tempo caratteristico di rilassamento e di fluage.