

Uso della reologia per ottimizzare le caratteristiche del calcestruzzo

Marco Massidda

Abstract

Parole chiave

reologia, tixotropia, fluidità, stabilità, robustezza

1. Introduzione

La reologia (dal greco “ῥέω” scorrere e “λογία” studio) è la scienza che studia lo scorrimento e la deformazione della materia, in particolar modo dei fluidi, sotto l'azione di forze deformanti. Essa definisce infatti la relazione fra lo sforzo interno del materiale e la sua deformazione, tenendo conto del modo di applicazione delle forze, dello stato della materia e dei procedimenti meccanici, fisici e chimici che questa ha subito.

Lo studio della reologia dei materiali permette di prevedere il loro comportamento in determinate condizioni di utilizzo, e di poter selezionare e influenzare le loro caratteristiche più interessanti. Lo studio delle proprietà del calcestruzzo fresco si basa sull'ipotesi che esso possa essere considerato come un fluido formato da una sospensione di aggregati di dimensioni variabili (fase trasportata) nella pasta di cemento (fase trasportatrice).

Il comportamento reologico dei materiali può essere studiato tramite una relazione costitutiva, che rappresenta un'idealizzazione del reale comportamento dei materiali. Essa descrive la relazione tra lo sforzo di taglio τ e la velocità con cui esso viene applicato al materiale, il gradiente di taglio $\dot{\gamma}$.

Una delle relazioni costitutive più usate per descrivere il comportamento dei materiali cementizi è quella di Bingham $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$ nella quale lo sforzo di taglio τ dipende dallo *yield stress* τ_0 , che rappresenta lo sforzo necessario per iniziare il flusso e dalla *viscosità plastica* μ che descrive la resistenza al flusso una volta che il valore dello *yield stress* è stato superato.

Alcune miscele di calcestruzzo mostrano un comportamento *shear-thinning*, cioè la viscosità diminuisce all'aumentare della velocità di deformazione, per esse la relazione di Bingham

rappresenta una eccessiva semplificazione. Il modello di Herschel-Bulkley $\tau = \tau_0 + a\dot{\gamma}^b$ permette di rappresentare il comportamento non lineare di queste miscele.

Entrambe queste relazioni sono state usate negli studi sperimentali.

Un'altra importante caratteristica reologica è la tixotropia.

La tixotropia può essere definita come una *“riduzione della viscosità, reversibile e dipendente dal tempo, che si verifica in alcuni materiali quando sono sottoposti ad uno sforzo costante”*.

Quando un materiale tixotropico è a riposo, si sviluppa una struttura a rete tridimensionale per via di fattori come le forze intermolecolari e colloidali. L'applicazione dello sforzo di taglio causa una rottura di questa struttura a rete e una riorientazione o una deformazione delle particelle o dei fiocchi, che comporta una riduzione della viscosità anche se la velocità di taglio oppure lo sforzo di taglio rimangono costanti.

Dopo che lo sforzo di taglio viene applicato per un periodo sufficiente, il materiale raggiunge una condizione di equilibrio per la quale la viscosità è minima per quel gradiente di taglio o sforzo di taglio. Quando l'applicazione dello sforzo di taglio viene interrotta, dopo un certo periodo di tempo la struttura tridimensionale si riforma e la viscosità originale viene infine ripristinata.

La tixotropia nel calcestruzzo è una proprietà importante perché aumenta la stabilità, limitando l'occorrenza di difetti come il bleeding e i nidi di ghiaia.

2.Descrizione del programma di ricerca

La mia tesi di laurea è stata svolta in collaborazione con la Leibniz Universität di Hannover, in Germania, dove ho svolto tutta la fase di sperimentazione e di analisi dei dati.

Lo scopo della tesi è quello di studiare le proprietà reologiche e le caratteristiche di differenti miscele di pasta cementizia, al fine di migliorare le proprietà del calcestruzzo fresco, ed ottenere degli utili criteri di mix-design.

Esiste una vasta letteratura in materia che mostra come le caratteristiche reologiche del calcestruzzo dipendono quasi interamente dalle caratteristiche reologiche della pasta di cemento.

Infatti, un aumento della **tixotropia** migliora la stabilità del calcestruzzo. Un aumento dello **yield stress** aumenta la stabilità del calcestruzzo, ma diminuisce la sua fluidità. Una diminuzione della **viscosità plastica** invece, aumenta la fluidità.

Nella prima fase della sperimentazione sono state determinate queste caratteristiche reologiche per varie miscele di pasta di cemento.

Dalla selezione delle paste di cemento aventi le migliori caratteristiche reologiche, sono state ottenute delle malte. I test sulle malte hanno mostrato come le caratteristiche delle paste di cemento influenzano le seguenti proprietà del calcestruzzo:

- La **lavorabilità**, il calcestruzzo deve avere una certa consistenza e poter facilmente fluire nelle casseforme per raggiungere le zone meno accessibili e dense di armature;
- La **stabilità**, ossia la capacità di mantenere l'uniformità di distribuzione dei componenti, anche quando l'impasto è sottoposto a forti vibrazioni, come sono quelle derivate dai dispositivi di pompaggio. Una buona stabilità del calcestruzzo diminuisce l'occorrenza di fenomeni come la segregazione degli inerti ed il bleeding;
- La **robustezza**. Con questo termine si intende l'abilità dei mix di mantenere costanti le loro proprietà, indipendentemente da piccoli cambiamenti nelle quantità degli ingredienti. È tipico, ad esempio, che si debba modificare la quantità di acqua nell'impasto, allo scopo di migliorare la lavorabilità. Se questa aggiunta non è eccessiva, ed il calcestruzzo ha una buona robustezza, esso manterrà le sue proprietà invariate. La robustezza è importante per le imprese produttrici, che hanno interesse ad ottenere un prodotto con caratteristiche costanti e garantite.

Questo tipo di studio non è comune in Italia, dove l'attività di ricerca si focalizza più sul calcestruzzo stesso che sui suoi componenti. Inoltre i test eseguiti non sono tratti da normative internazionali, ma sono stati sviluppati durante il periodo di ricerca.

Il punto di partenza della sperimentazione è stato lo studio di una composizione di riferimento di pasta di cemento denominata "REF". Si è osservato quindi come variano le proprietà reologiche e la fluidità delle paste di cemento al variare di:

- V_w/V_f , cioè il rapporto acqua-fini (fly ash + cemento): 0,8-0,9-1,0-1,2
- Quantità di superfluidificante : 0-1,5-3-4,5-6-7,5
(percentuale del volume di superfluidificante rispetto al volume dell'acqua)
- Quantità di VMA (Additivo Modificatore di Viscosità): 0-1
(percentuale del volume di VMA rispetto al volume dell'acqua)

Nella fase successiva, gli stessi test sono stati ripetuti con i mix di tipo "ROB", contenenti una quantità d'acqua superiore rispetto ai "REF" (20 litri d'acqua per metro cubo in più). I test su queste miscele sono serviti a controllare come variano le proprietà reologiche in seguito a questa aggiunta, cioè la robustezza dei mix.

In totale sono stati svolti 130 test sulle paste di cemento.

La **fluidità** è stata misurata con il Mini slump flow test, tramite misura del diametro dello slump flow. Sono stati eseguiti 51 test di fluidità.

Le proprietà reologiche invece sono state determinate con un dispositivo di alta precisione, un reometro rotazionale. In questa fase di sperimentazione è stato fondamentale elaborare e calibrare il tipo di test che descrivesse al meglio le caratteristiche reologiche, un compito non sempre facile. Infatti le caratteristiche del materiale influenzano la metodologia di ricerca, per cui è stato necessario effettuare numerose prove per individuare i test più idonei.

Il “Rheo test” è stato scelto per stimare lo **yield stress** e la **viscosità plastica**, mentre la **tixotropia** dei vari mix è stata studiata con il “Thixo test”. Sono stati eseguiti 51 Rheo test e 28 Thixo test.

I dati grezzi provenienti dal reometro rotazionale, sono stati successivamente elaborati. Con un approssimazione ai minimi quadrati, si è trovato il modello reologico che rappresenta al meglio il comportamento dei mix.

In questa fase si è notato che il comportamento delle miscele era prevalentemente di tipo *shear-thinning*, cioè per esse la viscosità diminuiva all’aumentare della velocità di deformazione. La relazione di Herschel-Bulkeley è quella che descrive meglio questo comportamento, ma presenta il difetto di non usare un solo parametro per determinare la viscosità, bensì due. È perciò più complicato con essa comparare la viscosità di diverse miscele, mentre non ci sono problemi quando si vuole comparare lo yield stress. Quindi, usando un approccio ibrido, la viscosità plastica è stata valutata con la relazione costitutiva di Bingham, mentre lo yield stress è stato valutato con la relazione di Herschel-Bulkley.

Dopo aver selezionato le paste di cemento aventi le migliori caratteristiche reologiche, con esse sono state ottenute delle malte. Su di queste sono stati eseguiti altri test, al fine di determinare come le proprietà reologiche della paste influenzino le caratteristiche del calcestruzzo fresco.

I test sono stati eseguiti sulle malte invece che sul calcestruzzo stesso, perché la granulometria fine ed uniforme di queste permette di collegare facilmente i risultati della sperimentazione alle sole proprietà reologiche delle paste di cemento, in modo che le caratteristiche degli inerti e il loro grado di compattamento non influenzino i risultati dei test. Inoltre i test eseguibili sulle malte sono più semplici, quindi la possibilità di errore viene ridotta.

Sono stati eseguiti 40 test sulle malte di cemento.

Nei test sulle malte la percentuale di superfluidificante è stata mantenuta costante, poiché la quantità ottimale è stata già determinata grazie ai test sulle paste di cemento.

Sono stati eseguiti 24 test sulla lavorabilità. Questa è stata testata in 3 modi diversi: Mini slump flow test-per misurare la **fluidità**, V-funnel test e Penetration test per stimare la **viscosità** dei mix.

Per studiare la **stabilità** sono stati elaborati due tipi di test, il Sieve-Sedimentation test ed il Washout test. Per ciascuno di essi sono stati eseguiti 8 test, nei quali, con una tavola vibrante, vengono simulate le condizioni del calcestruzzo durante il pompaggio.

Il Sieve-Sedimentation test non ha dato risultati affidabili, e non è stato usato nell’analisi dei risultati per valutare le caratteristiche dei mix. Questo test è risultato molto sensibile a piccoli cambiamenti nel volume del campione esaminato e inevitabilmente una piccola parte del volume del provino viene persa per via delle manovre effettuate durante il test. Il Washout test invece ha fornito risultati molto più precisi ed affidabili.

3. Analisi dei dati

I test eseguiti hanno mostrato il comportamento fortemente variabile dei materiali cementizi in risposta all'aggiunta di differenti quantità di acqua, superfluidificante e VMA. In generale si è notato che un aumento del rapporto acqua-fini V_w/V_f diminuisce le proprietà reologiche, mentre l'uso del VMA le incrementa.

Tra i principali risultati raggiunti, si è riscontrato che un incremento di superfluidificante superiore al 3% in volume rispetto al volume dell'acqua presente nel mix non determina una diminuzione sostanziale dello yield stress, quindi una ulteriore diminuzione della stabilità dei mix.

Allo stesso modo, una volta superata questa percentuale, la viscosità plastica diminuisce molto più lentamente, perciò l'aumento della fluidità che si può ottenere sarà modesto.

I mix con questa percentuale hanno anche un buon livello di tixotropia, proprietà che aumenta la stabilità del calcestruzzo.

Questa percentuale rappresenta quindi il punto di ottimo per la quantità di superfluidificante.

I risultati dei test sulle malte mostrano che l'uso del VMA diminuisce la fluidità, anche in seguito ad un incremento del rapporto V_w/V_f acqua-fini nei mix. Una forte diminuzione della viscosità si può ottenere aumentando il rapporto acqua-fini, mentre l'uso del VMA non la influenza particolarmente.

Nonostante il VMA diminuisca la fluidità dei mix, i risultati del Washout test mostrano che la stabilità viene considerevolmente incrementata con la sua aggiunta.

Comparando la fluidità, la viscosità e la stabilità dei mix REF, con le stesse proprietà dei mix ROB (aventi 20 litri d'acqua per metro cubo in più rispetto ai REF), è stata determinata la robustezza di questi mix ad una variazione della quantità di acqua.

Si è osservato che un aumento della robustezza può essere ottenuto aumentando il rapporto acqua-fini, mentre l'uso del VMA la diminuisce, in alcuni casi anche notevolmente.

4. Conclusioni e futuri sviluppi

In conclusione si può affermare che le indagini sulle paste di cemento rappresentano un modo efficace per controllare e ottimizzare i parametri necessari ad ottenere un calcestruzzo di qualità.

Grazie agli studi sulle paste di cemento è stato possibile trovare la percentuale di super fluidificante che rappresenta il compromesso ottimale tra l'esigenza di avere un calcestruzzo con ottime caratteristiche ed il risparmio economico.

Si è osservato che l'uso del VMA ha una forte influenza sulle proprietà reologiche. La sua aggiunta ha migliorato la stabilità contro le vibrazioni, ma ha diminuito la lavorabilità. La scelta del suo uso sarà da determinare secondo le esigenze progettuali, si dovrà sempre garantire la lavorabilità minima richiesta unita ad una buona stabilità contro le vibrazioni.

Infine, si è osservato che la robustezza della fluidità, della viscosità e della stabilità può essere incrementata aumentando il rapporto acqua-fini V_w/V_f , al contrario l'uso del VMA diminuisce la robustezza di queste proprietà.

Per avere una verifica dei risultati ottenuti con le malte e le paste di cemento, ulteriori studi potrebbero essere eseguiti sul prodotto finito, il calcestruzzo. Sarebbe utile verificare le caratteristiche di pompabilità di questi calcestruzzi per vedere se la stabilità alle vibrazioni e la lavorabilità vengano mantenute anche durante il pompaggio.

L'aggiunta di altri tipi di additivi e l'uso contemporaneo di altri componenti fini potrebbero essere testati in successivi studi per verificare come questi nuovi componenti interagiscono con i componenti originari.

Inoltre, sarebbe interessante trovare delle relazioni quantitative tra le caratteristiche reologiche, compresa la tixotropia, e le caratteristiche di interesse del calcestruzzo fresco che dipendono dall'insieme di esse. Quindi quantificare in quale grado ciascuna proprietà reologica, oppure altre proprietà dei componenti del calcestruzzo, influenzino le caratteristiche del prodotto finito.