

# COSTRUIRE CON LA SLIPFORM

Vito Alunno Rossetti<sup>1</sup>, Antonella Ferraro<sup>2</sup>, Paolo Locatelli<sup>3</sup>

1 Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente, Sapienza Università di Roma

2 clinicadelcalcestruzzo, Roma

3 Impresa Astaldi, Roma

## SOMMARIO

L'impiego del sistema costruttivo basato sulla Slip form, o cassero scivolante, consente di accrescere la velocità di getto e ridurre i costi per la realizzazione di edifici alti, torri, pile e simili. Nella presente nota vengono descritti alcuni dettagli peculiari della tecnica della Slipform, mettendo anche in evidenza aspetti di tecnologia del calcestruzzo che richiedono attento controllo e monitoraggio, per non incorrere in difetti tipici, che possono essere anche gravi.

In considerazione del fatto che le caratteristiche del conglomerato che determinano la bontà dei risultati devono variare anche in funzione della temperatura ambiente e della velocità di salita della cassaforma, si descrive sinteticamente un metodo messo a punto in cantiere basato sulla misura del tempo di presa del calcestruzzo in laboratorio e in cantiere, che consente di aggiustarne la composizione variando un solo componente della miscela.

## BUILDING WITH THE SLIPFORM

### SUMMARY

Building with a Slipform allows to increase the casting rate and to reduce costs when constructing high rise buildings, towers, piles and the like. In this paper some peculiar details of the slipform technique are described; also some aspects of concrete technology are evidenced that require careful control and monitoring, to avoid typical defects that can be serious.

Since the concrete properties that determine the goodness of the results must vary according to the ambient temperature and the raising speed of the form, a synthetic description is given of a method, set up in the yard, based on the measurement of the setting time of concrete, both in the laboratory and on site; the application of the method, allows a fast adjustment of the mix, by small variations of only one component of the mix.

### 1. PREMESSA

Giusto nel decennio in cui veniva pubblicata la prima Norma italiana sul cemento e sul cemento armato (1907), l'Ingegnere MacDonald collaudava e in seguito pubblicava il primo pionieristico lavoro [1] in merito all'impiego della Slip Form (o Slipform; in italiano cassero slittante o scorrevole).

Da allora questa tecnica si è affermata saldamente e in tutto il mondo, per realizzare nuclei di edifici alti, pile da ponte, silos, torri per ponti radio, ciminiere, piattaforme offshore pozzi e altre costruzioni. In questa nota, finalizzata alla presentazione di un metodo per risolvere alcuni problemi tecnologici relativi all'interazione tra calcestruzzo per slipform, si descriveranno in sintesi anche aspetti salienti del sistema costruttivo.

### 2. CASSERI RAMPANTI E SLIPFORM

Per realizzare strutture caratterizzate da altezza elevata (non meno di 30/40 metri per motivi di convenienza economica) e dalla presenza di pareti verticali o quasi verticali, come quelli sopra elencati, vengono spesso utilizzati casseri rampanti oppure slipform.

Mediante i primi (*Figura 1*) si realizza una costruzione discontinua: i casseri vengono riempiti, in seguito, allorché la resistenza del calcestruzzo raggiunge il livello richiesto,



*Figura 1 - Sistema di costruzione a cassero rampante. I casseri sono fissati alle pareti e, dopo il getto, smontati e sollevati in una posizione più alta, quando il calcestruzzo presenta una resistenza sufficiente (foto da Internet)*

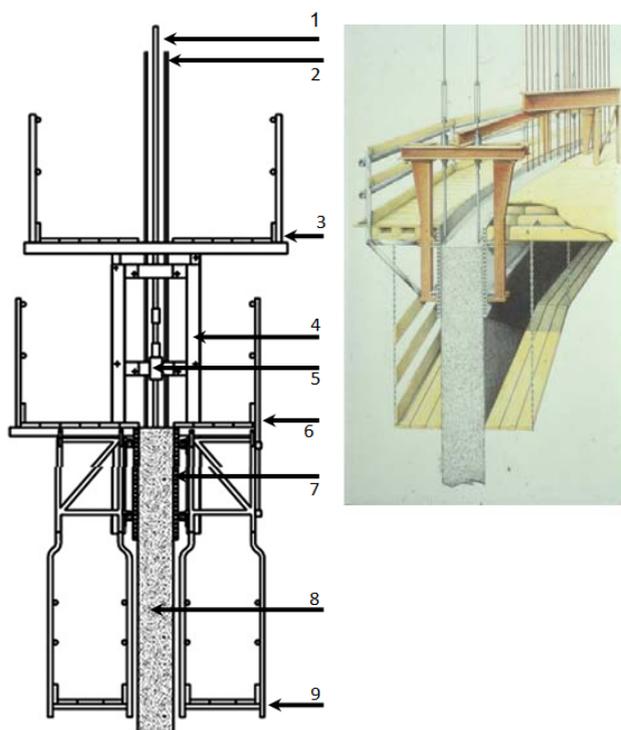
vengono smontati, sollevati mediante gru e fissati sul costruito, per poi proseguire nello stesso modo.

Questo procedimento non presenta problemi specifici di tecnologia del conglomerato cementizio relativi alle modalità costruttive, salvo la necessità di realizzare numerose riprese di getto, che per quanto possibile non devono costituire ‘giunti freddi’.

Con la slipform si realizza invece un processo continuo, nel quale i tempi di attesa dell’indurimento si riducono drasticamente, poiché a differenza del precedente i getti non vengono interrotti, rendendo possibili velocità di elevazione fino a 3 metri/d. Detto processo è stato paragonato ad un tipo di estrusione, in cui l’oggetto realizzato è in genere fermo e la forma in movimento. Con questo procedimento, anche se meno semplice dal punto di vista tecnologico, proprio per le maggiori velocità raggiungibili e per il ridotto uso della gru si realizzano notevoli risparmi, sia rispetto ai procedimenti tradizionali che richiederebbero impegnative impalcature sia rispetto all’impiego dei casseri rampanti.

### 3. LA TECNICA DELLA SLIPFORM

Come mostrato nella *Figura 2*, che descrive una tipica apparecchiatura di impiego attuale, l’intero sistema (slipform e piattaforme con parapetto per gli operatori) è sostenuto da un supporto a forma di giogo o staffa (n. 4 nella *Figura 2*).



*Figura 2 – Sezione e disegno della Slipform (da Internet con modifiche). Nel disegno è rappresentato per leggibilità un sistema a due sole piattaforme. Spiegazione dei numeri nel testo.*

Il sollevamento continuo del giogo, e quindi dell’intero sistema, è realizzato facendo scorrere un numero adeguato di martinetti idraulici (5) fissati sul giogo, su altrettante barre continue a perdere di acciaio, dette barre di sollevamento (1), che corrono dalla fondazione fino alla sommità delle pareti. Tali barre vengono progressivamente allungate con un semplice sistema a manicotti filettati. Sono possibili anche altre soluzioni, come ad esempio quella mostrata in *Figura 3* caratterizzata dall’assenza di tali barre (2).



*Figura 3 - Uso di slipform per costruire casseri a mare. Il cassero viene sollevato progressivamente mediante 4 gru. Non si impiegano le barre di sollevamento [4]*

I materiali principali, cioè barre di sollevamento o arrampicamento, armature verticali e orizzontali, vengono sollevati fino alla piattaforma superiore (3) mediante appositi montacarichi; il calcestruzzo viene portato mediante pompaggio a sistemi di distribuzione situati sulla piattaforma (3) e quindi trasferito con tubi getto all’interno delle forme (7).

Sulla piattaforma intermedia (6) si esegue il posizionamento delle armature ed il getto del calcestruzzo. Inoltre si controlla la vibrazione del calcestruzzo, eseguita normalmente con numerosi vibratori ancorati al cassero. Sulla piattaforma inferiore (9) si controlla il risultato dei getti ed eventualmente si eseguono le riparazioni occorrenti sull’elemento appena realizzato.

Da questa sintetica descrizione del processo si può intuire la grande importanza della logistica, ovvero dell’approvvigionamento dei materiali a terra e sulla piattaforma, e delle lavorazioni che devono essere eseguite in sito, come il posizionamento dei ferri e loro legatura, manicottatura e allungamento delle barre, pompaggio e distribuzione del conglomerato, controllo della vibrazione del calcestruzzo [3]; se queste operazioni non sono coordinate e nei tempi corretti mediante apposite procedure, risulterà difficile il controllo dei risultati.

### 4. ASPETTI TECNOLOGICI DELL’INTERAZIONE TRA CALCESTRUZZO E SLIPFORM

Il calcestruzzo per slipform deve ovviamente soddisfare requisiti di durabilità e resistenza appropriati per la costruzione da realizzare. Quanto alla lavorabilità e ancor di più alla velocità di indurimento, questi requisiti sono strettamente legati alla modalità con cui si procede alla costruzione, ovvero al modo di impiego della slipform. Infatti se il calcestruzzo non possiede tali requisiti al livello necessario, possono verificarsi notevoli inconvenienti e difetti.

Per categorizzare i difetti è innanzitutto necessario ricordare che, durante il getto, la slipform può essere sollevata solo se lo strato inferiore (*Figura 4*) di calcestruzzo nella cassaforma (7) presenta una resistenza sufficiente e uno spessore tale da sostenere il calcestruzzo al di sopra di esso (normalmente tale spessore è 20/30 cm). Al di sopra dello strato inferiore nella cassaforma (in fase di indurimento), si trova il calcestruzzo in fase di presa e al di sopra di questo si trova calcestruzzo semiplastico o fresco.

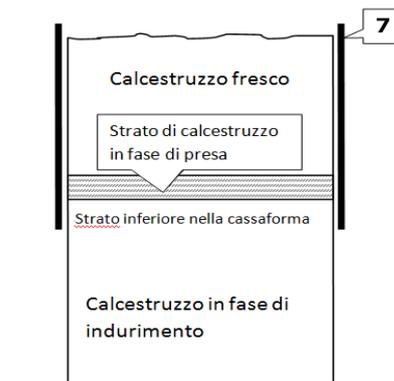


Figura 4 - Evoluzione della resistenza del calcestruzzo durante lo scorrimento della slipform.

In un sistema di getto con slipform ben progettato e condotto, soltanto una distanza corretta dello strato di calcestruzzo in fase di presa dal fondo della cassaforma può assicurare risultati privi di difetti (20/30 cm come si è detto).

#### 4.1 Difetti dovuti a trascinamento e strappo

Se lo strato di calcestruzzo in fase di presa è troppo distante dal bordo inferiore della cassaforma, o in altre parole se lo strato inferiore nella cassaforma è troppo spesso, per far scorrere verso l'alto la cassaforma, sarà necessaria una forza eccessiva per vincere l'aderenza sviluppata tra il calcestruzzo e la cassaforma stessa. A questo effetto può anche sovrapporsi un attrito locale eccessivo, dovuto a:

- un possibile sbilanciamento del peso della cassaforma,
- o alla presenza di superfici non piane nella stessa,
- oppure ad un batter insufficiente (con il termine batter o convergenza ci si riferisce al non parallelismo delle due pareti della cassaforma, che convergono in alto da 5 a 10 mm/m, proprio per facilitare il distacco del calcestruzzo inferiormente).

La conseguenza è che lo strato inferiore di calcestruzzo nella cassaforma può essere trascinato verso l'alto e strappato; si formano così grosse fessure orizzontali (Figura 5).

Lo strato più basso nella cassaforma, al di sotto dello strato in fase di presa, può diventare troppo spesso se:

- la velocità di indurimento è troppo alta (a causa di temperature elevate, o perché la miscela base presenta un'elevata velocità di indurimento, o si usano additivi acceleranti),
- la velocità di sollevamento della cassaforma è troppo bassa (difficoltà di approvvigionamento del calcestruzzo, dei ferri e del posizionamento di questi).



Figura 5 - Difetti dovuti a trascinamento e strappo

È palese la pericolosità di questi difetti dal punto di vista della durabilità, specialmente se la profondità delle fessure supera il copri ferro.

#### 4.2 Difetti dovuti ad insufficiente indurimento del calcestruzzo

Se lo strato di calcestruzzo in fase di presa è troppo vicino al bordo inferiore della cassaforma, in altre parole se lo strato inferiore del calcestruzzo al fondo della cassaforma non ha spessore sufficiente, esso può risultare troppo debole per sopportare il peso del calcestruzzo soprastante. Si può quindi verificare la formazione di rigonfiamenti e colature che, (ove osservabili) costituiscono difettosità evidenti (Figura 6).



Figura 6 - Colature e rigonfiamenti dovuti a calcestruzzo semifluido (al di sotto del bordo inferiore della slipform)

Nelle stesse condizioni sopra descritte, se lo strato soprastante al bordo inferiore della slipform è addirittura semifluido o fluido, esso può fluire (Figura 7) fuori della cassaforma. In questo modo possono formarsi delle grosse cavità, ricoperte in parte da scaglie sottili.

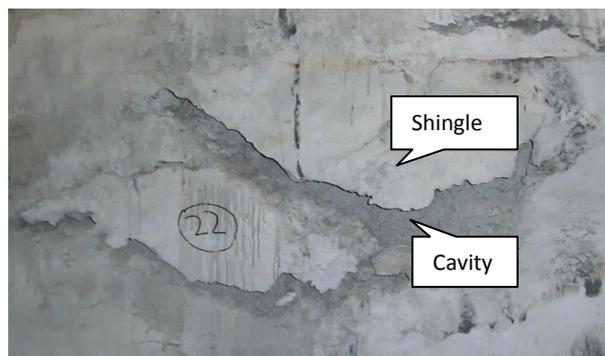


Figura 7 - Una quantità elevata di calcestruzzo, non ancora indurito, è fluita fuori della slipform, generando una cavità. L'adesione tra il calcestruzzo e la forma ha sostenuto scaglie (shingle) di calcestruzzo semi indurito

Lo strato inferiore nella cassaforma può essere troppo sottile se:

- la temperatura ambiente è troppo bassa,
- il tempo di presa e di indurimento del calcestruzzo è troppo lungo,
- la velocità di sollevamento della cassaforma è eccessiva.

Da quanto sopra si è accennato, si comprende che i fattori che intervengono sul buon funzionamento dello slipforming sono numerosi e, soprattutto, che è indispensabile un ottimo sincronismo tra la velocità di approvvigionamento dei materiali, la presa ed indurimento del calcestruzzo e la

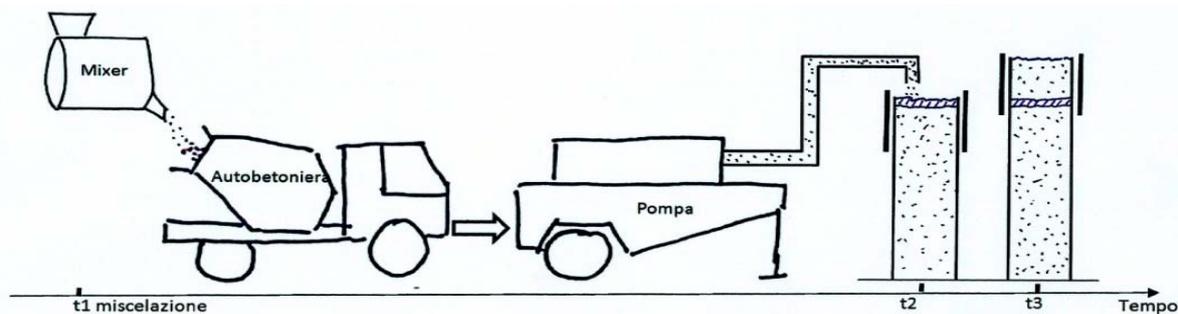


Figura 8 – Il tempo  $t_3$ , in corrispondenza del quale il calcestruzzo miscelato al tempo  $t_1$  e gettato al tempo  $t_2$  si trova nella posizione corretta a 20/30 cm dal fondo, deve corrispondere al tempo di inizio presa misurato con il plunger in cantiere o in laboratorio con il sistema Proctor

velocità di sollevamento della slipform. L'obiettivo è quello di assicurare che lo strato di calcestruzzo inizi la sua fase di presa allorché si trova a 20/30 cm dal fondo della slipform (Figura 8).

Si comprende anche che occorre tenere sotto controllo la posizione dello strato in fase di presa e, che in caso di posizione errata, si possa intervenire sulla velocità della slipform ed evitare inconvenienti. È evidente che questo procedimento non dovrebbe essere considerato di routine (come spesso avviene), ma solo come un intervento di emergenza; infatti la velocità di scivolamento dovrebbe essere un valore target di un determinato sistema di slipforming.



Figura 9 - Il plunger o ago, consente di misurare la distanza dal fondo dello strato in fase di presa

Per il corretto funzionamento del sistema è evidentemente necessario disporre di una misura continua della distribuzione della consistenza del calcestruzzo nella cassaforma, peraltro impossibile con mezzi o strumenti standard.

A conoscenza degli Autori della presente nota non esistono al momento indicazioni di carattere Normativo in proposito e anche la Guida dell'ACI Committee 347 [6] non fornisce alcun criterio quantitativo di resistenza per il sollevamento della slipform ma richiede di affidarsi all'esperienza di tecnici qualificati.

Attualmente la misura è normalmente eseguita a mano in sito, con una precisione sufficiente allo scopo, mediante l'impiego di cosiddetti "aghi" o plungers (Figura 9). Sono

tuttavia allo studio metodi per la misura del grado di idratazione, correlabili alla resistenza, si veda ad esempio [5], basato sulla valutazione della resistenza a breve mediante la misura della velocità superficiale delle onde ultrasoniche.

## 5 UN CASO DI STUDIO: IL TERZO PONTE SUL BOSFORO

La realizzazione del terzo ponte sul Bosforo (span di 1408 m), dalla parte europea a quella asiatica della Turchia, un'opera facente parte dell'autostrada "Northern Marmara Motorway" (in costruzione: Impresa Astaldi-Ictas) aggiudicata nel maggio 2012, e con data di apertura prevista a fine 2015, destinata a snellire il traffico di Istanbul, costituisce un importante caso di applicazione dello slipforming (Figura 10). Le quattro torri cave, inclinate e rastremate che sorreggeranno il ponte, sospeso e strallato, sono alte 320 m dei quali circa 200 m vengono realizzati mediante slipforming e, più in alto, circa 100 m con casseri rampanti.

Sono evidenti le difficoltà di tipo logistico, connesse con l'altezza delle torri ed anche con la variabilità della loro sezione e quelle legate all'ampia escursione termica stagionale, che può superare i 30 °C, anche con variazioni repentine di temperatura.

Le variabili principali da tenere sotto controllo allo scopo di sincronizzare la presa del conglomerato e la corretta posizione nel cassero sono:

- composizione della miscela/miscele di calcestruzzo (richiesta in capitolato aggiunta di loppa),
- temperatura del calcestruzzo,
- tempi di trasporto del calcestruzzo dalla centrale di betonaggio alla slipform,
- tempi di approvvigionamento dell'acciaio,
- tempo per la posa in sito dell'armatura,
- velocità di sollevamento della cassaforma,
- temperatura ambiente.

Gli Autori della presente nota hanno condotto uno studio per ottimizzare la composizione del calcestruzzo in funzione delle combinazioni delle variabili sopra elencate.

Il metodo originale ottenuto ha consentito, mediante misure di resistenza con plunger e di tempi di presa Proctor secondo ASTM C403 di varie miscele di calcestruzzo, di individuare la possibilità di ottenere un soddisfacente controllo del sistema, una volta assegnate le condizioni di:

- velocità di sollevamento del cassero,
- temperatura media ambiente,
- composizione della miscela base di calcestruzzo, con additivo superfluidificante a dosaggio e tipo costante.



Figura 10 – Il terzo ponte sul Bosforo in costruzione, vista dal lato Europa. Si riconosce la presenza di 4 impianti slipform, uno per ciascuna torre

Il controllo si realizza variando unicamente il dosaggio di un secondo additivo, ad effetto accelerante oppure ritardante a seconda delle condizioni individuate (estive o invernali) e mantenendo fissa, oltre alla composizione dei solidi della miscela anche la quantità e tipo del primo additivo ovvero il superfluidificante impiegato. In questo modo, non si modifica la lavorabilità della miscela né la sua composizione; l'unica correzione di composizione, (di un solo componente liquido a basso dosaggio), può essere eseguita tempestivamente e semplicemente in funzione delle variazioni delle variabili su elencate.

La caratterizzazione del calcestruzzo richiesta per individuare detta correzione della miscela è basata:

- sulla determinazione del valore di resistenza alla penetrazione mediante il metodo Proctor, eseguita nel laboratorio di cantiere, al momento  $t_3$  (Figura 8) in cui il calcestruzzo gettato al tempo  $t_1$  raggiunge la corretta resistenza nella corretta posizione nella slip-form in sito. Tale resistenza è designata PSV (Proctor Setting Value);

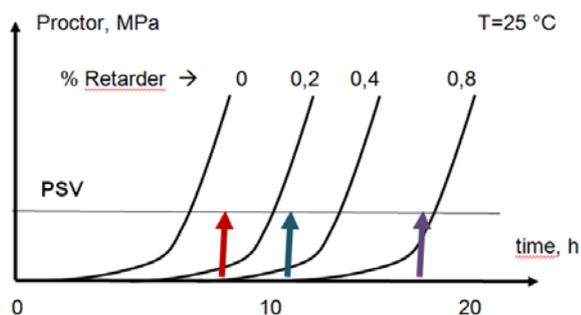


Figura 11 - Curve Proctor di resistenza alla penetrazione a 25°C; diversi dosaggi di additivo ritardante in % sul dosaggio di cemento

- è anche basata sulla caratterizzazione della risposta del calcestruzzo alle variazioni del dosaggio e del tipo del secondo additivo; richiede cioè la determinazione delle curve di resistenza alla penetrazione mediante il metodo Proctor, eseguita nel laboratorio di cantiere, eseguita sulla miscela base con diverse aggiunte del secondo additivo (Figura 11). Le curve Proctor riportate nella Figura 11 sono state ricavate alla temperatura media giornaliera di 25°C, quindi impiegando un additivo ritardante,
- Impiegando il grafico in Figura 11, ad esempio, a una temperatura media di 25°C, il sollevamento della slipform alla velocità target di progetto comporta un tempo  $t_3$  di circa 11 ore. Ciò consente di leggere nel

grafico il corretto valore dell'aggiunta del secondo additivo, in questo caso circa 0,25% sul dosaggio di cemento.

Qualora si verificasse la necessità di cambiare la velocità di salita della cassaforma, il tempo  $t_3$  verrebbe necessariamente a cambiare. In tal caso la miscela potrebbe facilmente venire corretta variando la percentuale di ritardante aggiunto alla miscela base (mantenendo come si è detto invariato il dosaggio di superfluidificante). Le frecce verticali indicano la possibilità di determinare il corretto dosaggio di additivo in funzione del tempo  $t_3-t_1$ , dipendente dalla velocità di sollevamento della slipform.

Ad esempio, se fosse necessario procedere ad una riduzione della velocità di risalita della slipform e del getto, tale da prolungare di due ore il tempo tra il getto stesso e il raggiungimento della posizione corretta del calcestruzzo nella forma, cioè il tempo  $t_3-t_2$ , aumenterebbe anche il tempo totale  $t_3$ , passando (nell'esempio) da circa 11 a 13 ore. Sarebbe pertanto necessario portare il dosaggio di additivo ritardante da circa 0,25 a 0,4%.

Naturalmente l'effetto di questa variazione di additivazione non si riscontrerebbe immediatamente sulla piattaforma ma solo dopo un numero di ore corrispondente al nuovo tempo  $t_3$ .

È evidente il fatto che, protrandosi la costruzione per numerosi mesi, a seconda della stagione la temperatura ambiente varierà notevolmente. La media giornaliera in Febbraio è infatti di circa 5°C, il che comporta la possibilità che per diversi giorni la temperatura media scenda vicino a 0°C.

Con elevate variazioni della temperatura ambiente, il grafico ottenuto a 25°C non è più utilizzabile; un grafico simile deve essere pertanto determinato di volta in volta operando alla temperatura media del cantiere.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] JAMES MACDONALD (1910) - "Moving Forms for Reinforced Concrete Storage Bins." *Proceedings of the Seventh Annual Convention Held at N.Y., N.Y. Volume 7*, By National Association of Cement Users (U.S.). Page 554
- [2] J. F. CAMELLERIE (1978) "Vertical slipforming as a construction tool"; *Concrete Construction*,
- [3] V. ALUNNO ROSSETTI, A. FERRARO, (2008): "Cassoni in cemento armato per il nuovo pontile della centrale termoelettrica Enel di Torrevadali", in

*Concreto* n. 83- 96-104

[4] TAREK ZAYED et al. (2008): “Slip-Form Application to Concrete Structures”; *Journal of Construction Engineering And Management* © Asce

[5] HYEJIN YOON, et al. (2013) - : “A Study on the Quality Control of Concrete during the Slip Form Erection of Pylon” *Engineering*, 2013

[6] ACI 347-04 (2005) “Guide to Formwork for Concrete,” *American Concrete Institute*