

# Influence of stress state on the pull-out test

## Effetto dello stato tensionale sulla prova di pull out

A. Brencich<sup>1</sup>, F. Bovio<sup>2</sup>, D. Pera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Civil, Chemical and Environmental Engineering, University of Genoa, Genoa, Italy*

<sup>2</sup> *Boviar s.r.l., Milan, Italy*

**ABSTRACT:** Quality controls of new constructions and retrofitting of existing buildings put forward the need for in-place estimation of concrete strength. Amongst the techniques developed to this aim, the pull-out inserts is considered one of the most reliable. In spite of their wide use, several issues still need a deeper insight: i) no pull out procedure is effective for concrete subjected to tensile stress states; ii) available correlation curves do not depend on the stress state. A new type of wedge anchor (B15G), jointly developed by the DICCA Laboratories of the University of Genoa and BOVIAR, is presented and discussed. The calibration of the procedure has been performed on 5 mixtures of concrete on different stress distributions. It has been found that the correlation curves, pull-out force vs. compressive strength, are not linear and depend on the stress state. / La prova di pull-out è riconosciuta come una delle tecniche più affidabili per la stima della resistenza del calcestruzzo in opera. In questo lavoro vengono presentati e discussi i dati delle campagne sperimentali svolte dai laboratori DICCA nell'ottica di analizzare i limiti di affidabilità della prova. Individuando i fattori di vulnerabilità delle attuali tecnologie si è potuti arrivare alla definizione di un nuovo sistema caratterizzato da: i) riduzione delle incertezze legate alla fase applicativa della prova; ii) materiali di alto livello che consentono di eseguire la prova con su calcestruzzi da 5 a 90 MPa. La nuova tecnologia B15G è stata calibrata su 5 miscele di calcestruzzo, e per 5 distinti stati tensionali. Le curve di correlazione tra forza di estrazione e resistenza a compressione del materiale così ottenute: i) sono marcatamente non lineari; ii) dipendono significativamente dallo stato tensionale; iii) presentano una dispersione statistica inferiore al 15%.

**KEYWORDS:** concrete strength; pull-out; moderately destructive tests; / resistenza del calcestruzzo; prova di pull-out; prove moderatamente distruttive.

### 1 INTRODUZIONE

La prova di pull-out consiste nella misura della forza necessaria ad estrarre un inserto metallico, con estremità allargata, ancorato nel calcestruzzo. La forza di estrazione viene applicata all'inserto da un martino idraulico e ad estrazione avvenuta si ottiene un frammento conico di calcestruzzo le cui dimensioni dipendono dalla geometria del sistema di prova.

Sulla superficie di rottura si manifesta uno Stato Limite Ultimo per taglio-trazione per cui la forza misurata costituisce una misura diretta della resistenza del materiale. Per questo motivo può essere correlata, mediante specifiche curve di taratura, alla resistenza a compressione del materiale.

Anche se l'idea originale risale agli anni '30, il pull-out moderno deriva dalla ricerca sviluppata in Danimarca negli anni '70 da Kierkegaard-Hansen (1975) e da quella sviluppata successivamente da Richards (1977) negli USA. La tecnica era impiegata per il controllo dello sviluppo di resistenza di strutture in fase di costruzione.

L'applicazione su strutture esistenti avviene solo in seguito. Le diverse tecnologie sviluppate utilizzano tasselli inseriti a posteriori (post-inseriti) che tendono a riprodurre condizioni geometriche analoghe a quelle dei tasselli pre-inseriti. Queste tecniche prevedono però l'utilizzo di strumentazione complicata e non sempre si riescono ad ottenere condizioni ideali per l'esecuzione della prova.

### 2 APPROCCI TEORICI E SPERIMENTALI

Contemporaneamente alla diffusione dell'impiego della prova di pull-out si è manifestata un'intensificazione degli studi analitici. La comprensione teorica del meccanismo di rottura risultava fondamentale per giustificare la correlazione tra forza di estrazione e resistenza del calcestruzzo.

I numerosi studi non hanno portato ad una soluzione univoca, tuttavia diversi aspetti hanno trovato riscontro in molte trattazioni.

Jensen Braestrup (1976) si appoggiarono alla teoria di Mohr-Coulomb con le ipotesi di: i) distribuzione uniforme delle tensioni sulla superficie di rottura; ii) angolo di attrito interno del calcestruzzo pari alla metà dell'angolo al vertice del frammento estratto. I limiti principali della trattazione furono individuati nel fatto che la previsione di resistenza non derivasse direttamente dalle ipotesi, ma solo dalla valutazione del comportamento osservato nei test.

Più tardi Ottosen (1981) propose un'analisi agli elementi finiti in cui studiava lo stato tensionale, e lo sviluppo delle fessure al crescere del carico, durante la prova di pull out. Il collegamento tra forza di estrazione e resistenza venne giustificato dall'apparente formazione di puntoni compressi, tra la testa dell'inserto e la corona di contrasto (Fig. 1).

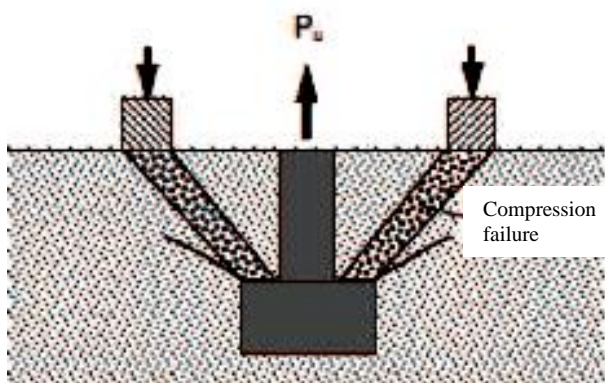


Figure 1 - Scheme of Ottosen's theory / Schematizzazione dei puntoni compressi ipotizzati da Ottosen

La teoria delle bande di compressione non trovò riscontro negli studi successivi in cui emerse un comportamento differente.

Carino e Stone (1987) osservarono, servendosi di un'analisi agli elementi finiti, la presenza di taglio e trazione sulla superficie di rottura. Inoltre, emerse che, il fenomeno fessurativo poteva essere distinto in due fasi:

1. Innesco della prima cricca al 25% del carico massimo che si arrestava al 50% per la presenza di forti sollecitazioni di compressione;
2. Al raggiungimento del 70% del carico ultimo, si formava un'altra frattura che definiva la forma finale del frammento estratto (Fig. 2).

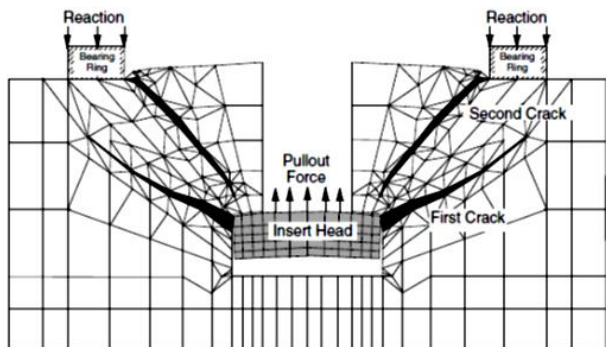


Figure 2 - Results obtained from Stone and Carino /risultati ottenuti da Stone e Carino

I differenti approcci presentavano comunque diverse analogie riguardo al comportamento fessurativo del calcestruzzo. Tuttavia l'interpretazione delle cause rimaneva controversa e questo fece nascere la necessità di utilizzare metodi più dettagliati per la comprensione di tale fenomeno.

Krenchel e Shah (1985) utilizzarono un monitoraggio ultrasonico per osservare lo sviluppo della fessurazione, all'interno del calcestruzzo, durante la prova. Questa tecnica consentì di individuare diversi passi nel corso dell'estrazione dell'inserto:

1. Formazione, attorno ad un valore pari a circa il 30% del carico ultimo, di fessure dovute alla trazione nella zona dello spigolo della testa dell'inserto (sistema primario);
2. Al crescere del carico si creano numerose microfessure, principalmente nella matrice cementizia o all'interfaccia con l'inerte, queste interessano gli aggregati solo ad elevati livelli di carico;
3. Ad un livello di carico pari a circa il 70% di quello ultimo, si innesca la frattura con angolo tra i 25° e i 45° dalla testa in direzione della corona di contrasto posta sulla superficie del calcestruzzo (sistema secondario);
4. Al raggiungimento del carico ultimo, il percorso preferenziale di frattura subisce la transizione da quello primario a quello secondario, ma non si manifesta alcuna deformazione sulla superficie del calcestruzzo che mostri l'avvenuta rottura;
5. Nelle fasi successive al raggiungimento del carico di rottura, la forza decresce gradualmente, si ha diffusione delle micro fessure fino a definire la forma del frammento estratto.

Grazie a questi risultati prende campo l'ipotesi che il processo di fessurazione possa essere interpretato attraverso la teoria della meccanica della frattura. Inoltre venne compreso che un approccio elastico limitava le trattazioni alle fasi antecedenti la fessurazione. Nei periodi successivi vennero proposti modelli più complessi.

Yener e Vajarasathira (1985) riprendono un'analisi agli elementi finiti di un modello elastoplastico in grado di prevedere lo sviluppo delle fessure. Come verifica di affidabilità del modello gli autori confrontarono i risultati ottenuti con i dati sperimentali presenti in letteratura.

I risultati mostrarono che le sollecitazioni, dovute all'estrazione dell'inserto, venivano continuamente ridistribuite fino a rottura a causa della propagazione e della formazione di nuove fessure.

Ballarini, Shah e Keer (1986) proposero un approccio basato sulla meccanica della frattura elastica lineare (LEFM). Questo modello permise di prevedere il percorso della frattura, e la sua stabilità, anche nelle condizioni di carico limite superato. La verifica dei risultati proposti venne effettuata conducendo, in parallelo, una campagna sperimenta-

le molto estesa. Il criterio utilizzato, quello di frattura in modo misto, riesce a definire la direzione di sviluppo della cricca ed il valore critico dei parametri che intervengono nel processo.

Tale modello prova che l'innesco del processo sia dovuto alle deformazioni di compressione, nella zona di frattura, ma anche alla presenza di tensioni di taglio e trazione.

Emerge inoltre che il comportamento generale a rottura durante il test sia profondamente influenzato dalle proporzioni geometriche dei campioni.

L'evoluzione dei modelli con livelli di dettaglio sempre maggiori, uniti a strumenti di calcolo più potenti, ha consentito di avere una miglior accostamento ai risultati sperimentali.

Più recentemente Piccinin, Ballarini e Cattaneo (2010) riprendono alcuni studi precedenti e propongono un'espressione per la previsione del carico ultimo di estrazione per sistemi di ancoraggio. In questa trattazione viene evidenziata l'influenza dello stato di tensione dell'elemento in cui è annegato l'inserito.

### 3 FATTORI DI INFLUENZA E LIMITI ESECUTIVI

I numerosi lavori analizzati hanno mostrato alcuni aspetti comuni nel comportamento dei materiali durante le prove e le analisi numeriche.

Malhotra e Carino (2004) hanno raccolto ed analizzato numerosi dati in merito alla prova di pull-out. In seguito hanno proposto un documento in cui segnalavano tutti i possibili fattori di influenza sulla stima della resistenza del calcestruzzo.

L'esperienza diretta derivante dall'attività di diagnostica condotta dai Laboratori del DICCA della Scuola Politecnica dell'Università di Genova ha consentito di indagare su quali fossero i limiti delle procedure in uso.

I limiti operativi della procedura di pull-out fino ad oggi impiegata sono riassunti schematicamente nel seguito.

#### 3.1 Dimensioni caratteristiche

In ogni problema che abbia lo scopo di ottenere una grandezza fisica attraverso una misura sperimentale devono essere considerate le geometrie in gioco.

È molto importante considerare che la presenza degli inerti, soprattutto quelli con diametri maggiori, possa alterare in maniera significativa il valore della forza di estrazione. Infatti, un aggregato sulla superficie di rottura può causare un aumento di forza di estrazione, causando una sovrastima della resistenza ad essa collegata.

Risulta quindi importante avere dimensioni degli inserti, profondità di posa e diametro della parte terminale (testa) tali da ridurre questo effetto.

#### 3.2 Procedure di prova

Per alcuni sistemi di prova è necessaria la realizzazione di un sottosquadro che risulta essere un'operazione complicata. Le procedure migliori richiedono l'impiego di strumentazioni aggiuntive e spesso costose (CAPO test). Nei sistemi per i quali l'attrezzatura è più semplice non si riesce ad ottenere una cavità adeguata alla buona riuscita della prova (FZA Zykon). Inoltre l'esecuzione su elementi in trazione e fessurati risulta pressoché irrealizzabile a causa dello scarso ancoraggio degli inserti metallici.

#### 3.3 Materiali impiegati

Alcune procedure non risultano impiegabili su calcestruzzi con resistenze superiori ai 50 MPa. Il verificarsi della rottura dell'inserito impedisce la stima della resistenza e causa problemi legati alla sicurezza degli operatori.

#### 3.4 Curve di correlazione

Le curve di taratura presenti in letteratura sono lineari, non tengono conto dell'effetto dello stato tensionale, e non passano per l'origine. Sarebbe invece ragionevole aspettarsi: i) una curva parabolica a concavità poiché la resistenza a trazione del calcestruzzo aumenta proporzionalmente con la resistenza a compressione; ii) che un materiale con resistenza a compressione nulla, ad esempio una sabbia perfettamente asciutta, dovrebbe presentare una resistenza all'estrazione anch'essa nulla.

Per quanto riguarda lo stato tensionale, è lecito aspettarsi che un elemento in compressione offra una resistenza all'estrazione superiore rispetto allo stesso elemento in condizioni di trazione.

### 4 CAMPAGNA SPERIMENTALE

Per poter superare i limiti di applicazione della prova di estrazione (pull out) è stata progettata ed eseguita una campagna sperimentale. Lo sviluppo di nuove geometrie, materiali e procedure si è concretizzato con la definizione di un nuovo tassello (B15G) in grado di essere impiegato su calcestruzzi ad alta resistenza e su elementi in trazione. Inoltre, grazie alle sue caratteristiche è stato possibile effettuare una taratura del sistema calcestruzzi con resistenze da 10 a 90 MPa e per diversi stati tensionali.

#### 4.1 Materiali e campionatura

Il calcestruzzo è stato caratterizzato con prove di compressione su provini standard e carote maturati in diverse condizioni ambientali. I valori di resistenza ottenuti (Tab.1) hanno permesso di definire le curve di maturazione relative ad ogni miscela prodotta (Fig. 3).

**Table 1.** Properties of concrete mixture produced / caratteristiche delle miscele prodotte

| ID  | tipo       | a/c | Dmax | Rc(28) | mat. | Rc(t) |
|-----|------------|-----|------|--------|------|-------|
| Cl  | cemento    |     | mm   | MPa    | gg   | MPa   |
| C10 | IIBLL32.5R | 1,2 | 17   | 9,6    | 1197 | 18,2  |
| C25 | IIBLL32.5R | 0,6 | 16   | 29,4   | 1198 | 42,5  |
| C40 | IIBLL32.5R | 0,5 | 16   | 36,0   | 1198 | 51,2  |
| C55 | IALL42.5R  | 0,3 | 17   | 55,8   | 1203 | 63,5  |
| C70 | IALL42.5R  | 0,3 | 22,5 | 74,1   | 1200 | 96,7  |

Per ogni miscela, identificata con un codice alfanumerico, sono stati prodotti campioni di diverse dimensioni in modo da poter riprodurre diversi stati tensionali:

- Prismi 25x25x45cm e 21x15x45cm per prove a diversi livelli di compressione (fig. 4a);
- Blocchi da 120x60x35 cm per prove a stato tensionale nullo (fig. 4b);
- Lastre 4000x1000x190 per prove in trazione e compressione non uniforme (fig. 4c).

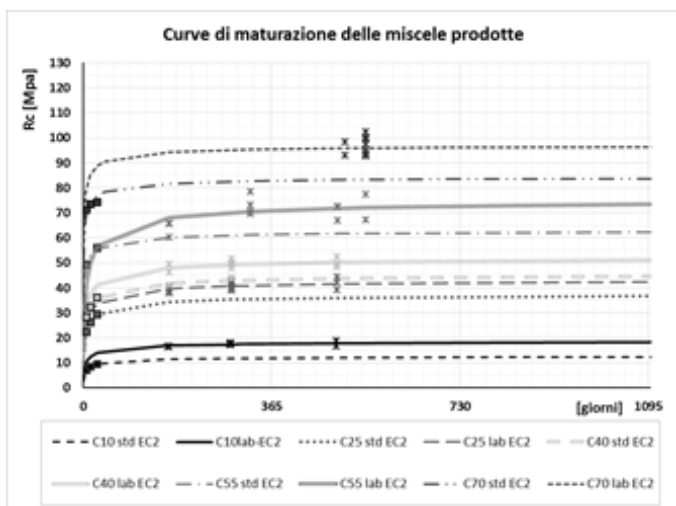


Figure 3- Strength progress for concrete in time/curve di maturazione per le miscele prodotte



Figure 4 – Specimens produced for the experimental campaign /Campioni prodotti per la sperimentazione

## 4.2 Il tassello B15G

Il tassello B15G è stato sviluppato con l'obiettivo di soddisfare alcuni requisiti:

- Applicabilità su calcestruzzi soggetti a stati tensionali di trazione, comprese le strutture fortemente fessurate;
- Calibrazione che tenga conto dello stato tensionale dell'elemento strutturale;
- Campo di applicazione (e di calibrazione) da 5 a 90 MPa;
- Riduzione degli aspetti tecnologici difficilmente controllabili (esecuzione del sottoguardo e percussione del tassello);
- Struttura modulare in modo da consentire il riutilizzo di alcune delle componenti del tassello.

Il diametro del foro (diametro esterno del tassello) è di 15mm con profondità di 50-55mm.

L'espansione del tassello avviene mediante avvvitamento di un dado con una coppia di 30 Nm (Fig. 5). L'espansione massima del tassello è di 19mm, l'aumento di 4mm in più rispetto al diametro permette di usare il tassello anche nel calcestruzzo fessurato.

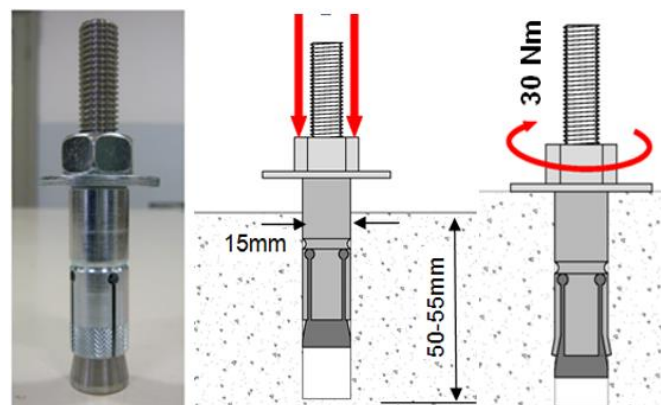


Figure 5 – B15G geometry and installation /geometria e procedura di messa in opera del tassello B15G

Le prove sperimentali eseguite con il nuovo tassello hanno mostrato molti elementi di riscontro con le ipotesi ed i test presenti in letteratura. In particolare si può osservare che:

1. Si manifestano due sistemi di fessurazione (fig.6) a diversi livelli di carico, la prima con direzione quasi parallela alla superficie, la seconda che parte dalla testa dell'inserto ed arriva al contrasto superficiale formando una porzione conica.
2. La forma del frammento estratto, quindi le modalità di propagazione della cricca, dipendono dalle proporzioni geometriche e dalla presenza della corona di contrasto (fig.7). L'assenza del contrasto provoca una riduzione della pendenza del cono estratto e non sono evidenti i due sistemi distinti di fessurazione.

3. L'effetto dello stato tensionale influisce sulla stima della resistenza del calcestruzzo in maniera significativa;
4. Al raggiungimento del carico massimo sulla superficie non sono presenti segni che evidenzino l'estrazione del frammento conico (fessura non completamente formata fino alla corona di contrasto);
5. La presenza di inerti sulla superficie di rottura può influire sul carico ultimo a seconda che si rompa o che si realizzi il fenomeno detto di interlocking con la matrice (fig. 8).

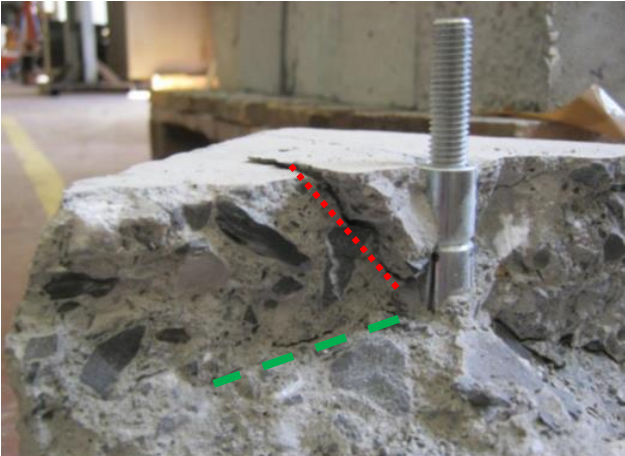


Figure 6 - Different crack system / diversi sistemi di fessurazione



Figure 7 - Free crack growth / propagazione della frattura senza il contrasto del martino



Figure 5 - Different aggregate behavior / diverso comportamento degli inerti

#### 4.3 Procedura di calibrazione

La campagna di calibrazione del tassello è stata eseguita sulle 5 diverse miscele di calcestruzzo, per differenti stati tensionali: i) compressione uniforme di 5MPa e 10MPa; ii) stato tensionale nullo; iii) compressione e trazione con forte gradiente (estradosso e intradosso di lastre inflesse).

Per ciascuna classe di calcestruzzo, in ogni condizione, sono state eseguite 12 prove di pull-out, per un totale nominale di 240 prove. Il numero totale delle prove eseguite è di oltre 400 tenendo conto anche delle prove che, per motivi contingenti, sono state ripetute.

I campioni utilizzati per le prove sotto l'effetto della compressione sono stati confinati in modo da riprodurre l'effetto delle staffe. Inoltre il livello di compressione impostato (5 e 10 MPa) rappresenta le usuali condizioni di progetto dei pilastri.

Lo stato intenso di trazione delle lastre ha provocato al loro intradosso vistose fessure, tuttavia l'impiego del tassello B15G ha permesso di estrarre sempre il cono di calcestruzzo senza sfilarsi.

#### 4.4 Risultati

Le figure da 9 a 12 riportano i dati sperimentali della campagna di calibrazione ed i loro valori medi. In ogni figura viene riportata la curva che approssima col minor errore la tendenza dei dati. Le curve tratteggiate individuano un fuso all'interno del quale gli scostamenti sono compresi tra +15% e -15%, rispetto alla curva di calibrazione dei valori medi.

La dispersione dei dati sperimentali è collocata nell'intervallo -8% / +8% rispetto al valore medio. Inoltre è possibile osservare che le curve d'interpolazione siano rappresentate da una funzione di potenza e non lineare.

Le curve di calibrazione differiscono in misura tutt'altro che marginale in funzione dello stato tensionale (Fig. 13). A titolo di esempio se si considera una pressione di estrazione di 100bar si ottengono stime della resistenza rispettivamente di 20 o 30MPa a seconda che l'elemento strutturale sia compresso o in trazione.

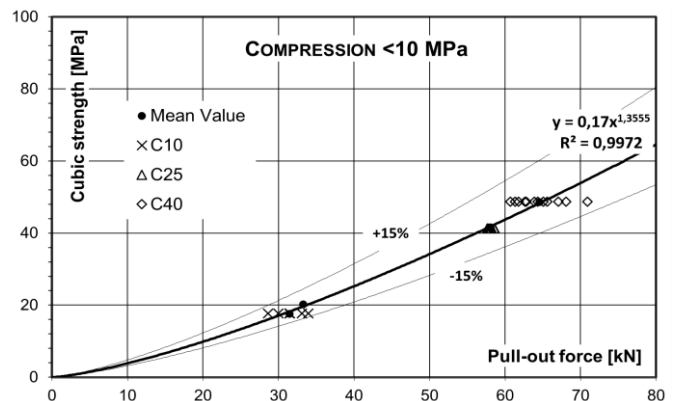


Figura 9 – Calibration curve for compression /Curva di calibrazione per stati di compressione (5 e 10 MPa).

## 5 CONCLUSIONI

The pull-out test combines a limited damage and good accuracy in the evaluation of in situ concrete strength. However the common used procedures have some limits due to the material properties of the wedge anchor and the definition of the calibration curve.

A new procedure was proposed that combines the B15G anchor bolt with a new approach derived from the theoretical analysis of the method and the experimental data collected. The new procedure allow to make a pull out test on high strength concrete and on structures in traction. Moreover the new technology is consistent with the theoretical approaches proposed by several authors.

Using this new method it was possible to make an experimental campaign with the aim to verify the effect of the stress state on the pull out force.

The results have 15% dispersion and the calibration curves obtained by a power function showed a good precision. A more accurate estimate of the concrete strength results in a better level of knowledge of the structure, then a reduction in the costs of intervention.

The choice of a power function derived by the best fit of the experimental data and it is essentially different to the most common correlation functions (linear).

Finally, very important is the stress state effect. This is usually neglected in the calibration curves, but the results show a strong variance between the different cases (it is possible to commit an error from 2 to 5 times higher).

La prova di pull out unisce un danno limitato ad una buona precisione nella stima della resistenza del calcestruzzo in situ. Tuttavia le tecniche attualmente utilizzate presentano alcuni limiti legati ai materiali che li compongono ed alla definizione delle curve di correlazione con la resistenza del calcestruzzo.

Grazie ad un'attenta analisi teorica del metodo associata allo studio dei risultati sperimentali, è stato possibile realizzare un nuovo sistema che superasse le criticità individuate.

Il nuovo tassello B15G e la procedura ad esso associata, nati dalla suddetta sperimentazione, permettono di eseguire il test su calcestruzzi ad alta resistenza e su elementi in trazione. L'efficacia della nuova tecnologia trova riscontro anche negli approcci teorici presenti in letteratura.

Grazie a questa tecnologia è stato possibile verificare quanto l'effetto dello stato tensionale degli elementi influenzi la forza di estrazione, e di conseguenza la stima della resistenza del calcestruzzo (Fig.13).

La limitata dispersione dei risultati della sperimentazione ( $\pm 15\%$  rispetto al valore medio), indicano una buona precisione del metodo nella stima della

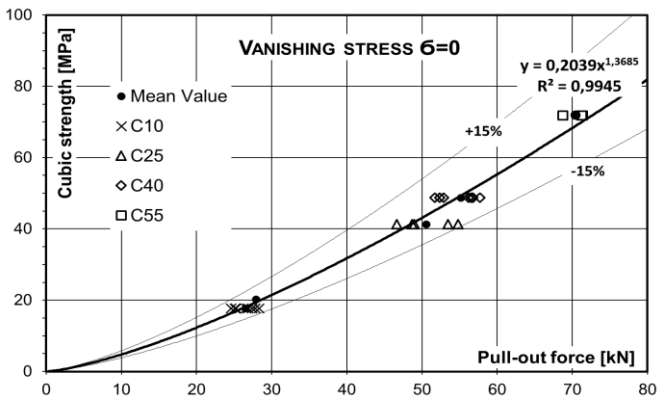


Figura 10 - Calibration curve for vanishing stress /Curva di calibrazione per stati di tensione nulli.

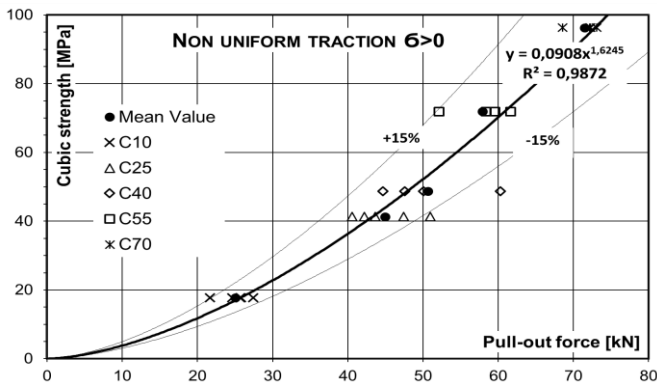


Figura 11 - Calibration curve for non-uniform tensile stress /Curva di calibrazione per stati di trazione non uniforme.

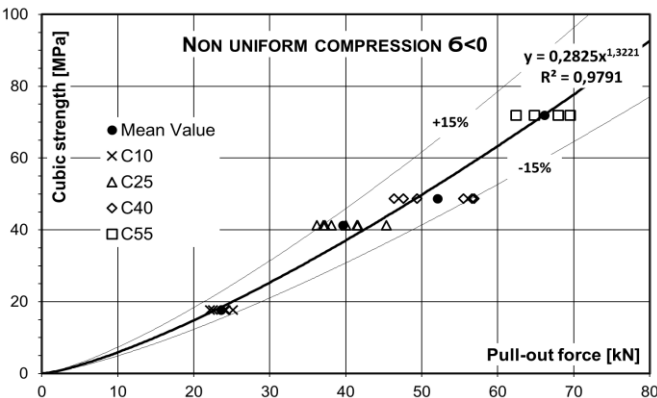


Figura 12 - Calibration curve for non uniform compression /Curva di calibrazione compressione non uniforme.

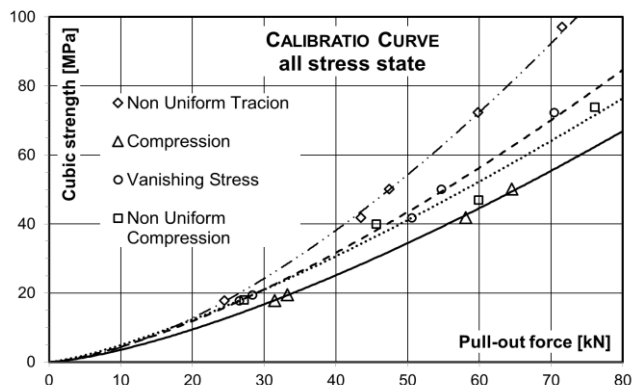


Figura 13 - Comparison between the different curves /Confronto tra le diverse curve di calibrazione.

resistenza del calcestruzzo. Questo si traduce in un maggior livello di conoscenza della struttura garantendo la possibilità di ridurre i costi di un eventuale intervento.

L'interpolazione dei dati sperimentali mostra che le curve di correlazione, tra forza di estrazione e resistenza del calcestruzzo, sono costituite da funzioni di potenza (e non lineari, come invece riportato frequentemente).

Infine è emerso come lo stato tensionale abbia una forte influenza sulla forza di estrazione. Le relazioni ottenute mostrano come il fatto di trascurare questo fattore possa portare ad un errore, da 2 a 5 volte maggiore, nella stima della resistenza del calcestruzzo.

## RINGRAZIAMENTI

Il progetto e la realizzazione della campagna sperimentale sono state condotte grazie al supporto della ditta di calcestruzzi Farina, alla BOVIAR s.r.l. ed al Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del dipartimento DICCA dell'università di Genova.

## REFERENCES

- Ballarini, R., Shah, S. P. and Keer, L.M. (1986). Failure characteristics of short anchor bolts embedded in a brittle material. *Proc. R. Soc. Lond. A* 404, 35-54.
- Carino, N.J. and Stone, W.C. 1987. Analysis of in-place test data with spreadsheet software, in *Computer Use of Statistical Analysis of Concrete Tests*, ACI SP-101, P. Balaguru and V. Ramakrishnan, Eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Jensen, B.C. and Braestrup, M.W.. 1976. Lok-tests determine the compressive strength of concrete, *Nord.Betong*, 2, 9.
- Kierkegaard-Hansen, P., Lok-strength, *Nord. Betong*, 3, 19, 1975.
- Krenchel, H. e Shah, S.P. (1985). "Fracture analysis of the pullout test". *Materieux et Constructions*, Vol. 18, No. 108.
- Malhotra, V.M., Carino, N.J., *Handbook on NonDestructive Testing of Concrete*, 2nd ed, CRC Press, Boca Raton, 2004.
- Ottosen, N.S. 1981. Nonlinear finite element analysis of pullout test, *ASCE J. Struct Div.*, 107(ST4), 59.
- R. Piccinin; R. Ballarini, F.ASCE2; and S. Cattaneo (2010). "Linear Elastic Fracture Mechanics Pullout Analyses of Headed Anchors in Stressed Concrete" *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 136, No. 6. ©ASCE, ISSN.
- Richards, O., Pullout strength of concrete, *Reproducibility and Accuracy of Mechanical Tests*, ASTM SP 626, 1977, 32.
- Yener, M. and Vajarasathira, K.. 1985. Plastic-fracture finite element analysis of pullout tests, *Preprints of the 22nd Annual Technical Meeting of the Society of Engineering Science*, ESP22/8so38, Pennsylvania State University.