

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA DELLE STRUTTURE

XVII CICLO

Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”

**MODELLAZIONE ANALITICO – NUMERICA E COMPORTAMENTO
SPERIMENTALE DI ELEMENTI IN CALCESTRUZZO FIBRO - RINFORZATO**

Tesi presentata per il conseguimento del titolo di

Dottore di Ricerca in ingegneria delle Strutture

da

Gianluca Galli

Coordinatore del Corso di Dottorato

Prof. Ing. Franco Maceri

Tutore del candidato

Prof. Ing. Antonio Grimaldi

Dipartimento di Ingegneria Civile

Giugno 2007

*Io stimo più il trovar un vero,
benché di cosa leggiera,
ché il disputar lungamente delle massime questioni,
senza conseguir verità nissuna.
(Galileo Galilei)*

RINGRAZIAMENTI

Desidero esprimere tutta la mia riconoscenza alle persone che mi sono state vicine nel corso di questi anni e che hanno indubbiamente contribuito al risultato di questo lavoro. I miei ringraziamenti vanno al Prof. Grimaldi, che ho sempre avuto ad esempio, dal quale ho imparato e spero di continuare ad imparare, a Zila per la pazienza, la gentilezza e l'indiscutibile aiuto, ad Enrico, Maurizio, Giuseppe, Bernardo ed a tutti agli amici veri e sinceri ed a Maria che mi è stata sempre vicina e mi ha confortato in tutti i momenti difficili.

Indice

| | |
|----------------------------------|---------------|
| Capitolo 1 – Introduzione | <i>pag. 1</i> |
|----------------------------------|---------------|

Capitolo 2 – Calcestruzzo fibrorinforzato

| | |
|---|----------------|
| 2.1 Introduzione | <i>pag. 5</i> |
| 2.2 I calcestruzzi ad elevate prestazioni (HC) | <i>pag. 7</i> |
| 2.3 I calcestruzzi fibrorinforzati (Fiber Reinforced Concrete) | <i>pag. 16</i> |
| 2.4 Sollecitazione di flessione per calcestruzzi fibrorinforzati | <i>pag. 28</i> |
| 2.5 Valutazione del comportamento globale del calcestruzzo fibro-rinforzato | <i>pag. 32</i> |

Capitolo 3 – Legame costitutivo del materiale – prove sperimentali a trazione

| | |
|--|----------------|
| 3.1 Introduzione | <i>pag. 46</i> |
| 3.2 Previsione analitica e legami semplificati | <i>pag. 48</i> |
| 3.3 Analisi sperimentale | <i>pag. 56</i> |
| 3.4 Risultati sperimentali – prove a trazione | <i>pag. 73</i> |

Capitolo 4 – Legame costitutivo del materiale – prove sperimentali a flessione

| | |
|--|-----------------|
| 4.1 Introduzione | <i>pag. 94</i> |
| 4.2 Identificazione del legame costitutivo del materiale con prove a flessione | <i>pag. 96</i> |
| 4.3 Esempi applicativi | <i>pag. 103</i> |
| 4.4 Indagine numerica e confronti | <i>pag. 110</i> |

Capitolo 5 – Analisi di elementi strutturali

| | |
|---|-----------------|
| <i>5.1 Introduzione</i> | <i>pag. 121</i> |
| <i>5.2 Modello analitico</i> | <i>pag. 123</i> |
| <i>5.3 Modello numerico</i> | <i>pag. 138</i> |
| <i>5.4 Indagine analitico – numerica di elementi inflessi</i> | <i>pag. 147</i> |
| <i>5.5 Indagine analitico – numerica di elementi rinforzati</i> | <i>pag. 160</i> |

Capitolo 6 – Conclusioni *pag. 169*

Bibliografia *pag. 173*

Lista dei simboli

| | |
|--------------------|---|
| σ_c | Tensione calcestruzzo |
| σ_s | Tensione dell'acciaio |
| ε_c | Deformazione del calcestruzzo |
| ε_{c0} | Deformazione del calcestruzzo in corrispondenza della tensione di picco |
| ε_f | Deformazione della fibra |
| ε_{cd} | Deformazione relativa alla tensione $0.3f_{ck}$ |
| f'_c | Rsistenza cilindrica del calcestruzzo |
| f_{ck} | Resistenza caratteristica a trazione del calcestruzzo |
| f_{cm} | Resistenza media a compressione del calcestruzzo |
| E | Modulo elastico |
| G_f | Energia di frattura |
| τ_b | Tensione tangenziale di aderenza |
| V_f | Volume di fibre |
| n | Coefficiente di omogenizzazione |
| w | Apertura di fessura |
| b | Base della sezione rettangolare |
| H | Altezza della sezione rettangolare |
| x_c | Asse neutro della sezione |
| A_{sc} | Area armatura compressa |
| A_{st} | Area armatura tesa |
| s | Spessore rinforzo in FRC |
| M | Momento flettente sollecitante |
| $F \equiv P$ | Azione sollecitante |
| r | Raggio medio della fibra |
| \emptyset | Diametro medio (su media pesata) delle barre di armatura |
| δ | Copriferro |
| l_f | Lunghezza della fibra |
| d_f | Diametro equivalente della fibra |
| m | Massa della fibra |
| n_f | Numero medio di fibre sull'unità di area nella sezione fessurata |
| η_0 | Fattore di efficienza |
| η_1 | Coefficiente lunghezza efficace |

| | |
|-----------|---|
| ω | Coefficiente d orientazione delle fibre |
| h_0 | Lunghezza di ancoraggio delle fibre |
| f_{eq} | Resistenza a trazione equivalente |
| f_{Fts} | Resistenza a trazione residua di esercizio |
| f_{Ftu} | Resistenza a trazione residua ultima |
| l_{cs} | Lunghezza caratteristica dell'elemento strutturale |
| S | Spostamento assoluto della traversa della macchina di prova |
| s_i | Spostamenti parziali |
| K | Rigidezza estensionale degli elementi |
| ρ | Curvatura della sezione |
| θ | Rotazione della sezione |