

CALCOLO DI UN MURO DI SOSTEGNO: METODO SEMIPROBABILISTICO E SOLUZIONI EFFICIENTI

Elevate competenze e strette logiche di mercato: il calcolo strutturale al giorno d'oggi

Le Norme tecniche per le costruzioni DM 14/01/2008 hanno vincolato il calcolo strutturale all'utilizzo di complessi software commerciali, mentre la difficile situazione economica in cui viviamo ha cambiato il modo di lavorare dei progettisti: da un lato le Leggi richiedono un continuo approfondimento delle tematiche strutturali, una grande competenza in termini di calcolo automatico e l'esecuzione di verifiche sempre più complesse anche per tipologie strutturali apparentemente semplici; dall'altro, il progettista non dispone del tempo necessario per interiorizzare il risultato di strumenti spesso troppo automatizzati.

Mentre il controllo dei risultati mediante calcolo manuale si traduce in una spesa in termini di tempo, l'eccesso di fiducia nei risultati prodotti da strumenti veloci e performanti, ma incapaci di ragionare, comporta il rischio di non accorgersi di errori grossolani. Ne consegue che, per qualsiasi tipologia di progetto, un'attività professionale efficiente e consapevole necessita di strumenti semplici ma, allo stesso tempo, controllabili con facilità e in grado di rispettare le prescrizioni delle normative vigenti.

Tali strumenti sono inoltre necessari a fianco di altri più complessi per l'analisi globale delle costruzioni, sia per la validazione numerica, sia per la soluzione di alcuni problemi ricorrenti.

Si prosegue l'articolo affrontando un caso pratico, cioè il progetto di un muro di sostegno, per il quale lo sviluppo delle verifiche di sicurezza risulta oneroso se rapportato alla semplicità del manufatto. Per tale ragione, si analizzeranno le problematiche di calcolo e le soluzioni da utilizzare per condurre la progettazione in maniera efficiente e consapevole.

Analisi di un muro di sostegno

Si immagini di progettare un muro di sostegno sia dal punto di vista strutturale, sia geotecnico. Definite le condizioni al contorno del problema (geometria del muro, stratigrafie, carichi agenti, etc.), che costituiscono i dati di input, il progetto si configura come un iter che contempla diverse condizioni di carico (statiche, sismiche), diversi meccanismi di rottura (per verifiche strutturali e geotecniche) e diversi stati temporali (breve e lungo termine).

Si può rappresentare graficamente il cammino che porta dai dati di input ai risultati di calcolo con un diagramma come quello di Figura 1, facendo così emergere le due seguenti considerazioni:

- a partire dai dati di input, si delineano N "situazioni" di verifica in parallelo, tutte da considerare ai fini di una trattazione esaustiva del problema;
- la linea rossa definisce il cammino che costituisce la "soluzione finale", ovvero la casistica che funge da progettante per un certo tipo di meccanismo.

Ne consegue che il professionista che vuole padroneggiare il progetto un muro di sostegno deve necessariamente tenere in considerazione tutte le possibili situazioni di verifica e individuare quella più tassativa.

NAMIRIAL SPA

Sede legale,
direzione e amministrazione
60019 Senigallia (AN)
via Caduti sul Lavoro, 4

**Unità locale principale
ANCONA**

Sviluppo, area commerciale
e assistenza
60131 Ancona (AN)
via Breccie Bianche, 158/A
tel. +39.071.205380
fax +39.199.401027

**Unità locale
MODICA**

Sviluppo, area commerciale
e assistenza
97015 Modica (RG)
via Sacro Cuore, 114/C
tel. +39.0932.763691
fax. +39.199.401027

**Unità locale
REGGIO EMILIA**

Sviluppo e assistenza
Software Strutturale
42124 Reggio Emilia (RE)
Via Meuccio Ruini, 6
tel. +39.0522.1873995
fax. +39.199.401027

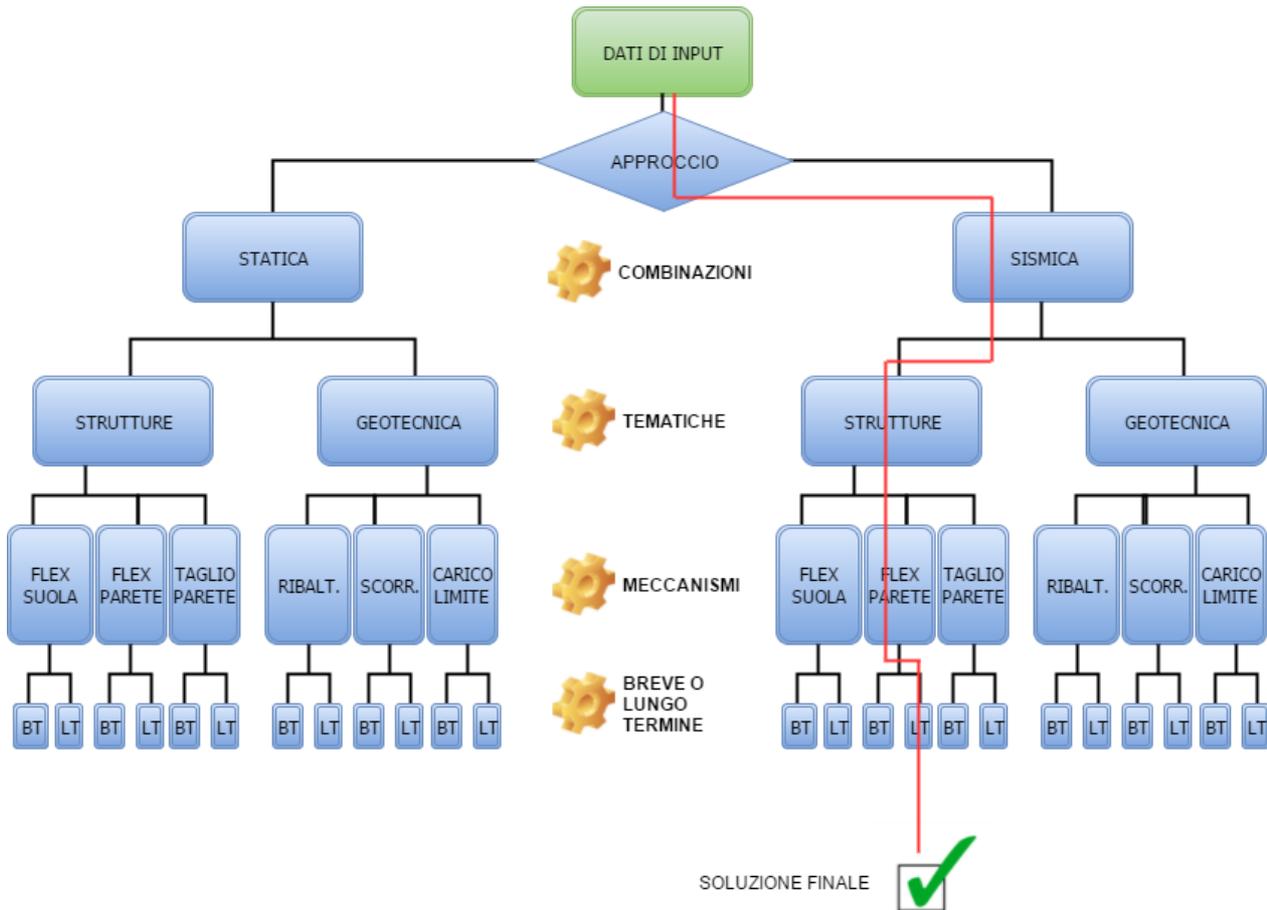


Figura 1 - diagramma di flusso per la verifica della flessione della parete

Problematiche rispetto al passato: approccio semiprobabilistico e aumento dell'onere computazionale

Si è detto che l'attuale situazione normativa ha reso più oneroso il calcolo delle strutture. Considerando infatti quanto prescritto dalle normative precedenti (DM 1992, DM 11/03/1988) per la verifica del manufatto, risultava evidente una maggior semplicità di calcolo, in quanto:

- era prevista un'unica combinazione la determinazione dei carichi;
- era prevista un'unica metodologia per la determinazione delle resistenze (fattori di sicurezza);

A fronte di queste due condizioni, il muro poteva essere tranquillamente progettato e verificato nella sua interezza mediante calcolo manuale.

Con l'avvento della normativa attuale (DM 14/01/2008), la situazione cambia notevolmente. La verifica del medesimo manufatto contempla infatti nuove problematiche:

- sono previste verifiche in condizioni statiche e sismiche;

NAMIRIAL SPA

Sede legale,
 direzione e amministrazione
 60019 Senigallia (AN)
 via Caduti sul Lavoro, 4

Unità locale principale ANCONA

Sviluppo, area commerciale
 e assistenza
 60131 Ancona (AN)
 via Breccie Bianche, 158/A
 tel. +39.071.205380
 fax +39.199.401027

Unità locale MODICA

Sviluppo, area commerciale
 e assistenza
 97015 Modica (RG)
 via Sacro Cuore, 114/C
 tel. +39.0932.763691
 fax. +39.199.401027

Unità locale REGGIO EMILIA

Sviluppo e assistenza
 Software Strutturale
 42124 Reggio Emilia (RE)
 Via Meuccio Ruini, 6
 tel. +39.0522.1873995
 fax. +39.199.401027

- sono previste diverse tipologie di approcci progettuali, dipendenti dalla tipologia di verifica che si sta affrontando (verifiche geotecniche sul piano di posa, di ribaltamento, verifiche strutturali, etc.);
- si utilizzano diversi coefficienti di combinazione dei carichi, in relazione all'approccio utilizzato (EQU, STR A1, GEO A2): ciò significa che, per ciascun approccio, occorre ricalcolarsi la risultante delle azioni in una certa combinazione di carico;
- si utilizzano diversi coefficienti parziali di sicurezza dei materiali (M1, M2), dai quali dipendono le caratteristiche geotecniche di progetto del terreno: tali valori influenzano sia le resistenze di progetto, sia le azioni sull'opera;
- anche i fattori di sicurezza dipendono dalla tipologia di approccio della verifica corrente (R1, R2, R3);

Di conseguenza, a parità di tipologie di verifica da eseguire (verifiche geotecniche nel breve e nel lungo termine di ribaltamento, di capacità portante, di scorrimento del piano di posa e di stabilità globale, verifiche strutturali della suola e della parete), l'onere computazionale aumenta in maniera considerevole: a titolo esemplificativo, si può assumere un fattore pari a

Aumento dell'onere computazionale rispetto al DM 11/03/1988 (indicativo) = 2 condizioni x (3 gruppi di azioni + 2 gruppi di coefficienti parziali + 2 gruppi di resistenze) = 14 volte!

Questo aumento rende chiare le problematiche citate nel primo paragrafo: nonostante il maggior impegno in termini di calcolo, le tempistiche richieste dalla committenza per lo sviluppo del progetto rimangono invariate e il progettista deve pertanto trovare una soluzione per risultare efficiente pur mantenendo il controllo dei risultati numerici.

Geometria	Dati di calcolo	Litotipi	Sondaggi	Armatura	Materiali
MURO					
Altezza H_1 (m)	Spessore s_1 (m)	Spessore s_2 (m)			
4	0.25	0.4			
Altezza H_2 (m)	Lunghezza L_1 (m)	Lunghezza L_{tot} (m)			
0.4	1.5	3			
incl. muro ψ (°)	incl. p. camp. β (°)	δ - % rispetto \emptyset			
89	0	66			
CARICO					
Distanza x_q (m)	Estensione L_q (m)	Carico q (kN/m ²)			
0	10	15			
APPROCCIO					
Tipo					
approccio I					

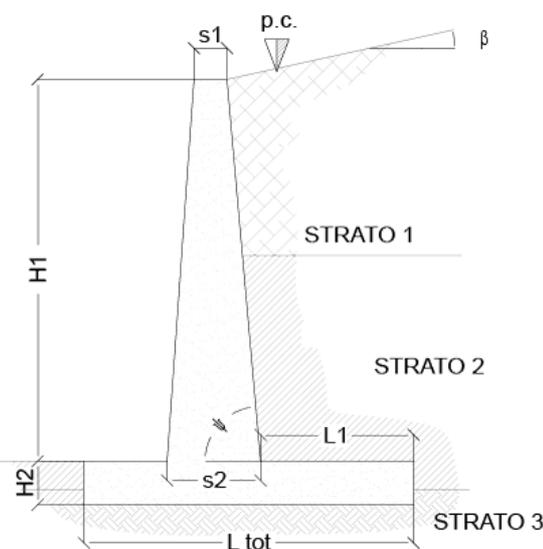


Figura 2 - geometria Muro di sostegno

NAMIRIAL SPA

Sede legale,
 direzione e amministrazione
 60019 Senigallia (AN)
 via Caduti sul Lavoro, 4

**Unità locale principale
 ANCONA**

Sviluppo, area commerciale
 e assistenza
 60131 Ancona (AN)
 via Brecce Bianche, 158/A
 tel. +39.071.205380
 fax +39.199.401027

**Unità locale
 MODICA**

Sviluppo, area commerciale
 e assistenza
 97015 Modica (RG)
 via Sacro Cuore, 114/C
 tel. +39.0932.763691
 fax. +39.199.401027

**Unità locale
 REGGIO EMILIA**

Sviluppo e assistenza
 Software Strutturale
 42124 Reggio Emilia (RE)
 Via Meuccio Ruini, 6
 tel. +39.0522.1873995
 fax. +39.199.401027



Verifiche di un muro di sostegno con efficienza e consapevolezza: esempio numerico

Si considera adesso un manufatto avente la geometria riportata in Figura 2, mentre le caratteristiche meccaniche dei terreni, i parametri sismici e le armature sono quelle sinteticamente rappresentate in Figura 3.

Geometria **Dati di calcolo** Litotipi Sondaggi Armatura Materiali

\bar{a}_g (m/s²) F_0 Cat. Sottosuolo Cat. Topografica

1.8044 2.48 cat. C T1

Geometria **Dati di calcolo** Litotipi **Sondaggi** Armatura Materiali

nome terreno p_s (kN/m³) C_u (N/mm²) C' (N/mm²) ϕ (°)

Terrapieno non coesivo 20 0 0 30

Geometria **Dati di calcolo** Litotipi **Sondaggi** Armatura Materiali

▼ Sondaggio

profondità falda (m) Permeabilità terreno (EC8 parte 5 app.E)

20 Terreno impermeabile in condizioni dinamiche ($k < 5 \cdot 10^{-4}$ m/sec)

Geometria **Dati di calcolo** Litotipi **Sondaggi** **Armatura** Materiali

* L'armatura è riferita ad un metro di profondità di muro.

PARETE

LATO VALLE				LATO MONTE			
n. ferri	Ø ferri (mm)	cp.ferro (m)	Area (cm ²)	n. ferri	Ø ferri (mm)	cp.ferro (m)	Area (cm ²)
5	12	0.03	5.655	5	12	0.02	5.655

Geometria **Dati di calcolo** Litotipi **Sondaggi** **Armatura** **Materiali**

CLS

tipo	modello	γ cls			
C25/30	parabola-rettangolo	1.5			
f_{ck} (N/mm ²)	f_{ctm} (N/mm ²)	f_{cd} SLU (N/mm ²)	f_{cd} SLE rara (N/mm ²)	f_{cd} SLE QP (N/mm ²)	ϵ_{cu}
25	2.565	14.1667	15	11.25	-0.0035

ACCIAIO

tipo	modello	γ acciaio	
B450C	bilineare finito con incrudimento	1.15	
E (N/mm ²)	f_y SLU (N/mm ²)	f_y SLE rara (N/mm ²)	ϵ_{yu}
200000	391.30434782609	360	0.0675

Figura 3 - condizioni statiche e geotecniche del muro di sostegno

NAMIRIAL SPA

Sede legale,
 direzione e amministrazione
 60019 Senigallia (AN)
 via Caduti sul Lavoro, 4

**Unità locale principale
 ANCONA**

Sviluppo, area commerciale
 e assistenza
 60131 Ancona (AN)
 via Breccie Bianche, 158/A
 tel. +39.071.205380
 fax +39.199.401027

**Unità locale
 MODICA**

Sviluppo, area commerciale
 e assistenza
 97015 Modica (RG)
 via Sacro Cuore, 114/C
 tel. +39.0932.763691
 fax. +39.199.401027

**Unità locale
 REGGIO EMILIA**

Sviluppo e assistenza
 Software Strutturale
 42124 Reggio Emilia (RE)
 Via Meuccio Ruini, 6
 tel. +39.0522.1873995
 fax. +39.199.401027



Ragionando sulla verifica a flessione della parete, risultano 4 possibili condizioni di verifica "in parallelo" da trattare: condizioni statiche e condizioni sismiche, entrambe da analizzarsi nel breve termine e nel lungo termine, ognuna delle quali comporta la verifica di più sezioni lungo l'altezza della parete.

Per il caso in esame, la verifica in condizioni sismiche a $z = 4\text{m}$ (sezione di attacco parete/suola) risulta essere la più tassativa e coincide con la linea rossa nel diagramma di figura 1. Risultano infatti i seguenti valori:

- per la condizione statica, sia nel breve, sia nel lungo termine (coincidenti poiché il terrapieno risulta composto da soli terreni non coesivi):
 - $N_{Ed} = -31.87\text{ KN}$, $M_{Ed} = 130.11\text{ KNm}$, $M_{Rd} = 154.80\text{ KNm}$, $FS = 1.190$;
- per la condizione sismica, nel breve termine:
 - $N_{Ed} = -37.32\text{ KN}$, $M_{Ed} = 132.21\text{ KNm}$, $M_{Rd} = 154.80\text{ KNm}$, $FS = 1.171$;

Ragionando invece sulla verifica a taglio della parete, i risultati cambiano: è infatti la condizioni statica a condurre ai peggiori coefficienti di verifica:

- condizione statica:
 - $V_{Ed} = 84.71\text{ KN}$, $V_{Rd} = 144.10\text{ KN}$, $FS = 1.701$;
- condizione sismica:
 - $V_{Ed} = 82.78\text{ KN}$, $V_{Rd} = 144.10\text{ KN}$, $FS = 1.741$;

Si potrebbe estendere questo ragionamento a tutte le rimanenti tipologie di verifica e il risultato non cambierebbe: è cioè impossibile prevedere a priori quale sia la "situazione" progettante e, per ciascuno dei punti di arrivo del diagramma in Figura 1, le caratteristiche di sollecitazione e di resistenza sono calcolate con modalità differenti. Per tale ragione, il progettista che vuole mantenere la piena consapevolezza delle sue scelte necessita di uno strumento veloce, pratico e controllabile come quello il cui output è riportato in Figura 4 (CalcOnFlight di Namirial S.p.A.), cioè in grado di governare efficacemente tutti i percorsi di calcolo rappresentati in Figura 1.

Risultati						
APPROCCIO I						
i Si riportano le condizioni più gravose tra quelle analizzate.						
Strutture - Comb. A1+M1+R1						
Parete						
M_{Ed} (kNm)	M_{Rd} (kNm)	FS		CC	Dren	Coord (m)
132.2009	154.7985	1.171	✓	SISMA KV>0	LUNGO TERMINE	4
V_{Ed} (kN)	V_{Rd} (kN)	FS		CC	Dren	Coord (m)
84.7086	144.1022	1.701	✓	STATICA	LUNGO TERMINE	4

Figura 4 - soluzioni progettanti per i meccanismi di flessione e taglio della parete

NAMIRIAL SPA

Sede legale,
 direzione e amministrazione
 60019 Senigallia (AN)
 via Caduti sul Lavoro, 4

**Unità locale principale
 ANCONA**

Sviluppo, area commerciale
 e assistenza
 60131 Ancona (AN)
 via Breccie Bianche, 158/A
 tel. +39.071.205380
 fax +39.199.401027

**Unità locale
 MODICA**

Sviluppo, area commerciale
 e assistenza
 97015 Modica (RG)
 via Sacro Cuore, 114/C
 tel. +39.0932.763691
 fax. +39.199.401027

**Unità locale
 REGGIO EMILIA**

Sviluppo e assistenza
 Software Strutturale
 42124 Reggio Emilia (RE)
 Via Meuccio Ruini, 6
 tel. +39.0522.1873995
 fax. +39.199.401027



Lo strumento citato presenta un ulteriore vantaggio: la possibilità di indagare nel dettaglio una singola tipologia di verifica. Ragionando infatti sui valori riportati in Figura 5, che provengono dalla sua relazione di calcolo, è immediato il calcolo del momento sollecitante alla base della parete in condizioni sismiche e pertanto la validazione dei risultati:

$$M_{Ed} = -(31.872 + 1.0036) \cdot 0.0024 + 45.564 \cdot 1.333 + 16.983 \cdot 2.007 + 10.488 \cdot 1.333 + 9.741 \cdot 2.4 = 132.20 \text{ KNm}$$

ANALISI SPINTE

Il polo delle Forze è il baricentro della sezione della parete.

I valori sono riferiti alla profondità di 1 m di muro e opportunamente amplificati dei coefficienti di tab. 2.6.I

Forze Stabilizzanti

Elemento	forza kN	distanza dal polo m
Forza Peso Parete	31.8716	-0.0024
Spinte Inerziali	1.0036	-0.0024

Forze Instabilizzanti

Elemento	forza kN	distanza dal polo m
Spinta terreno	45.5641	1.3333
Spinta Idrostatica	0	0
Componente Verticale Spinta Terreno (*)	0	0.2
Spinta Sovraccarico q	16.9835	2.0071
Componente Verticale Spinta Sovraccarico q (*)	-6.4514	0.2
Spinta Sismica	10.4877	1.3333
Componente Verticale Spinta Sismica (*)	-21.2921	0.2
Spinta Idrodinamica	0	0
Spinte Inerziali	9.7409	2.4

(*) Il segno negativo indica l'effetto stabilizzante della componente verticale.

(*) In questa sezione, a favore di sicurezza, la componente stabilizzante della componente verticale viene trascurata.

Figura 5 – resoconto dettagliato delle forze stabilizzanti e instabilizzanti in combinazione A1+M1+R1

Soluzioni per una progettazione efficiente e consapevole

L'analisi delle problematiche che concorrono nel progetto di un muro di sostegno ha così permesso di definire le **caratteristiche ideali di uno strumento di calcolo**:

- semplicità di input: i dati da inserire devono essere chiari ed immediati;
- risultati rapidi: si devono ottenere i risultati con pochi e semplici passaggi;
- visione d'insieme: il software deve mostrare il risultato globale della progettazione, che nel caso del muro di sostegno significa la contemporanea visualizzazione dei peggiori risultati di ciascuna tipologia di verifica. Se, ad esempio, lo scorrimento è la verifica più tassativa, dev'essere possibile capirlo in maniera chiara, per poter così ottimizzare il progetto della struttura;

NAMIRIAL SPA

Sede legale,
direzione e amministrazione
60019 Senigallia (AN)
via Caduti sul Lavoro, 4

Unità locale principale

ANCONA
Sviluppo, area commerciale
e assistenza
60131 Ancona (AN)
via Breccie Bianche, 158/A
tel. +39.071.205380
fax +39.199.401027

Unità locale

MODICA
Sviluppo, area commerciale
e assistenza
97015 Modica (RG)
via Sacro Cuore, 114/C
tel. +39.0932.763691
fax. +39.199.401027

Unità locale

REGGIO EMILIA
Sviluppo e assistenza
Software Strutturale
42124 Reggio Emilia (RE)
Via Meuccio Ruini, 6
tel. +39.0522.1873995
fax. +39.199.401027

- visione nello specifico: si deve avere la possibilità di indagare nel dettaglio una verifica. In tal modo, risulta possibile seguirne meglio i singoli passaggi e validarne i risultati mediante calcolo manuale;
- risultati controllabili rapidamente ed efficacemente: mediante la visione nello specifico, si seguono più facilmente i passaggi nel dettaglio; mediante la visione d'insieme, è più facile rintracciare errori grossolani.

Se l'articolo avesse trattato ulteriori "situazioni" progettuali (progetto e verifica di travi in legno, solai, giunti bullonati, etc.) e se i ragionamenti fossero stati estesi all'intera vita di un progetto (dalle fasi preliminari alla fine lavori), si sarebbero evidenziate altre due caratteristiche:

- interoperabilità tra tematiche: se il software si appoggia a moduli più semplici (ad esempio, uno per il solo calcolo della capacità portante di una fondazione), utilizzabili a loro volta, il progettista dispone di ulteriori strumenti per il controllo efficiente dei risultati; se invece contiene altri moduli di altra natura, questi potranno essere utilizzati in futuro per far fronte a tematiche diverse (ad esempio, la verifica di un giunto bullonato), senza doversi adattare a nuove logiche, convenzioni, etc.;
- accessibilità dello strumento: se il software è utilizzabile da smartphone / tablet, è possibile fornire risposte anche da luoghi che non siano la propria scrivania, quali ad esempio il cantiere durante la valutazione di una variante o durante un collaudo.

L'utilizzo di CalcOnFlight dimostra come sia possibile disporre di tutte queste caratteristiche all'interno di un software commerciale.

A cura di
Federico Francia
NAMIRIAL SPA

Conclusioni

CalconFlight di Namirial S.p.A. ti consente di affrontare la progettazione strutturale in modo efficiente e consapevole: semplice nell'uso, comprensibile nei risultati e aggiornato alle normative vigenti, è uno strumento che ti permette di risolvere soluzioni progettuali ricorrenti in un unico ambiente di lavoro. Eseguitabile da web, ti permette di lavorare sui tuoi progetti sia da pc, sia da smartphone e tablet.

[Clicca qui](#) per provarlo gratuitamente, basta solo registrarsi!



NAMIRIAL SPA

*Sede legale,
direzione e amministrazione*
60019 Senigallia (AN)
via Caduti sul Lavoro, 4

Unità locale principale ANCONA

*Sviluppo, area commerciale
e assistenza*
60131 Ancona (AN)
via Breccie Bianche, 158/A
tel. +39.071.205380
fax +39.199.401027

Unità locale MODICA

*Sviluppo, area commerciale
e assistenza*
97015 Modica (RG)
via Sacro Cuore, 114/C
tel. +39.0932.763691
fax. +39.199.401027

Unità locale REGGIO EMILIA

*Sviluppo e assistenza
Software Strutturale*
42124 Reggio Emilia (RE)
Via Meuccio Ruini, 6
tel. +39.0522.1873995
fax. +39.199.401027