

Prove sperimentali su cabine elettriche prefabbricate realizzate in Calcestruzzo Fibrorinforzato



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

Autori:

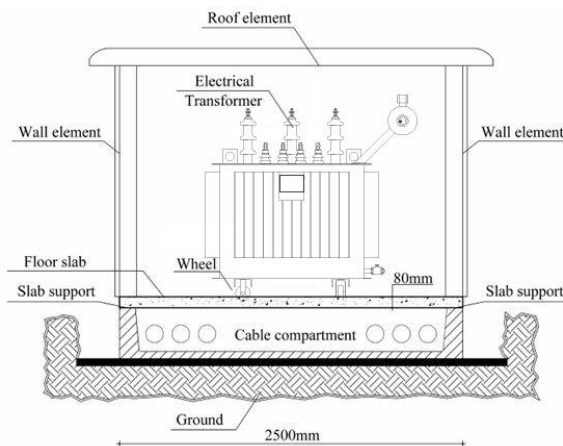
Ing. Luca Facconi, Ph.D

Prof. Ing. Giovanni Plizzari

**Università di Brescia,
Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e Matematica**

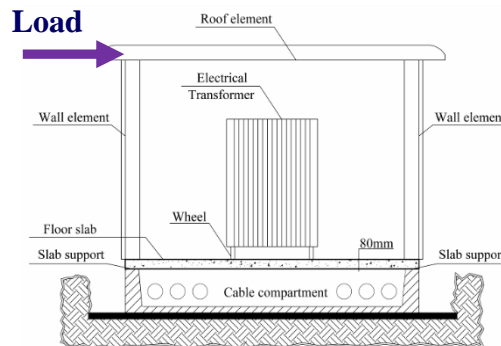
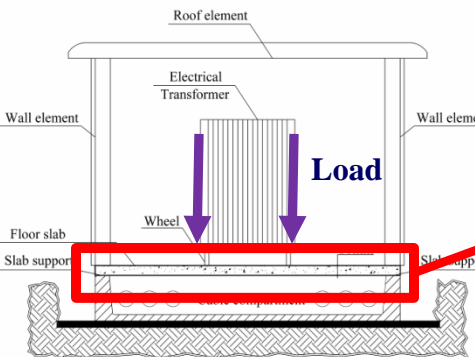
Obiettivi della ricerca

Studiare il comportamento strutturale di una cabina elettrica prefabbricata tipo, allo scopo di sostituire con fibre d'acciaio parte dell'armatura impiegata nei tradizionali manufatti in C.A.



PARTE I: Prove su elementi piastra soggetti a carico verticale

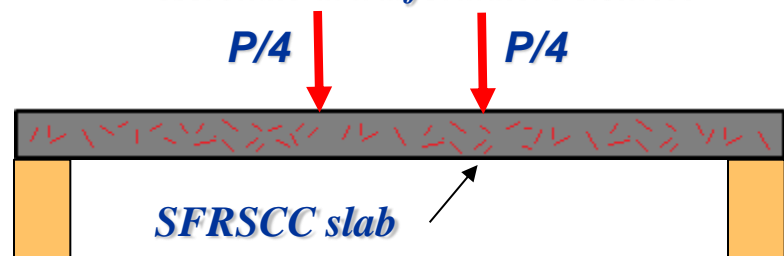
PARTE II: Prove su cabine elettriche soggette a carico orizzontale



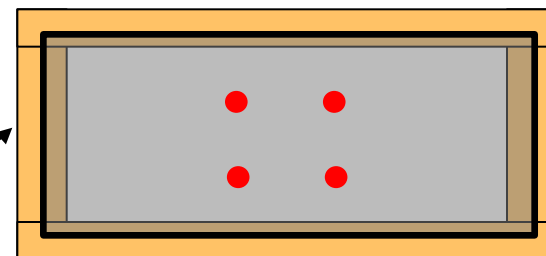
Prove su piastre sottili in SFRSCC: obiettivi

Lo studio ha l'obiettivo di verificare le prestazioni strutturali di piastre sottili realizzate in calcestruzzo autocompattante fibrorinforzato (SFRSCC).

Carichi concentrati (P/4) rappresentati il peso esercitato di trasformatore elettrico



Vista planimetrica



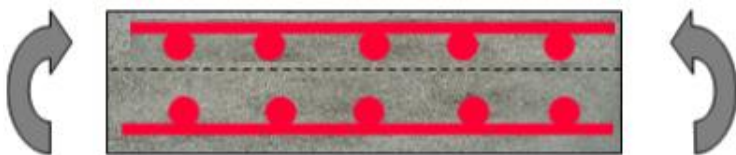
Appoggi

- I risultati dei test forniscono informazioni relativamente alla capacità portante e alla duttilità delle piastre rinforzate solo con fibre d'acciaio.

*- **OTTIMIZZARE L'ARMATURA DELLA PIASTRA** = individuare un'opportuna combinazione di fibre e armatura convenzionale, comunemente definita **armature ibrida (HRC)**, tale per cui:*

Capacità della piastra in C.A. \leq Capacità della piastra in HRC

Conventional reinforced SCC



Optimized reinforcement (SFRSCC+rebars)

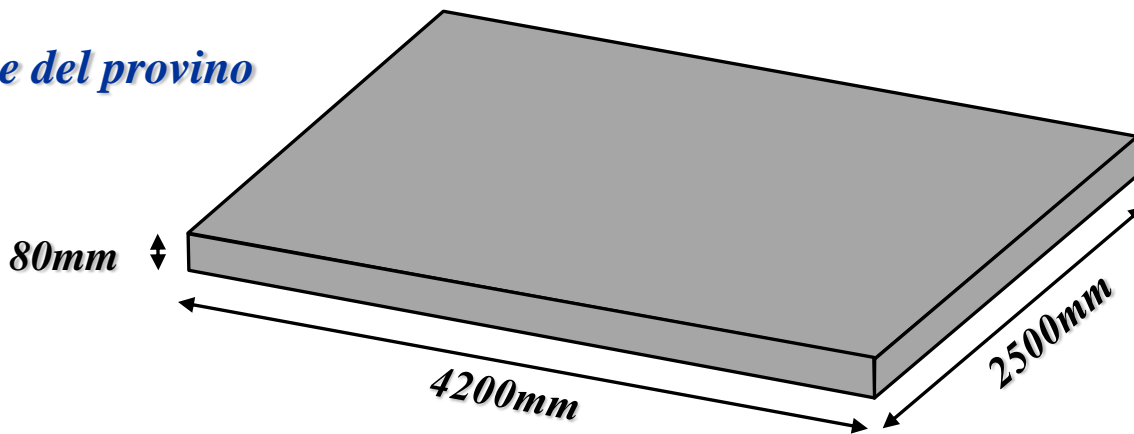


Prove su piastre sottili in SFRSCC: caratteristiche dei provini

*Nello studio sono state confrontate **5 piastre in SFRSCC** contenenti il medesimo dosaggio di fibre ($V_f=0.32\%$). Allo scopo di individuare il materiale più performante, si sono impiegate due diverse tipologie di fibre (Fibre **D e G**) e, conseguentemente, due diversi SFRSCC (**FRCD25 e FRCG25**).*

Provino	Dimensioni [m]	Materiale	Contenuto di fibre in peso [kg/m ³]	Contenuto di fibre in volume [%]
SD1-25	4.2x2.5x0.08	FRCD25	25	0.32
SD2-25				
SG1-25		FRCG25		
SG2-25				
SG3-25				

Caratteristiche del provino


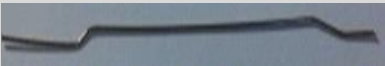


Prove su piastre sottili in SFRSCC: proprietà dei materiali

SFRSCC mix-design

CONCRETE MIXTURE	DOSAGE
Cement type	CEM 42.5R
Cement content (kg/m ³)	370
Fine aggregate 0/4 (kg/m ³)	838
Coarse aggregate 4/12 (kg/m ³)	762
Maximum aggregate size (mm)	12
Calcium Carbonate filler (kg/m ³)	280
Water-cement ratio	0.49
Super plasticizer (% on cement content)	1.10
Volume fraction of fibers V_f (%)	0.32

Proprietà delle fibre

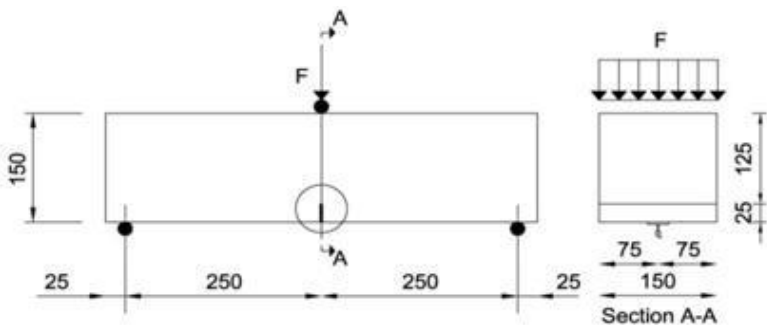
FIBER TYPE	SHAPE	L	Φ	L/ Φ	f_y	View of the fiber
		[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	
Fiber D	Hooked-end	60	0,90	67	>2300	
Fiber G	Hooked-end	32	0,40	80	>2200	

Prove di compressione su cubi da 150mm

Materiale: FRCD25 \longrightarrow $f_{cm,cube} = 60.7\text{MPa}$ - $f_{cm} = 0.83 f_{cm,cube} = 50.2\text{MPa}$ - $f_{ck} = 46\text{MPa}$

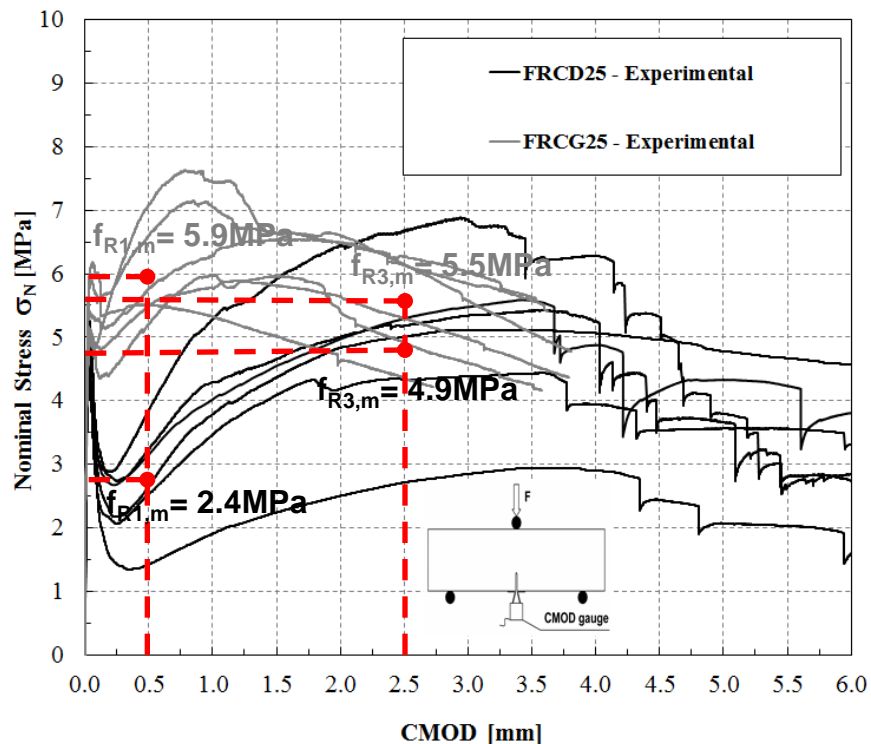
Materiale: FRCG25 \longrightarrow $f_{cm,cube} = 54.2\text{MPa}$ - $f_{cm} = 0.83 f_{cm,cube} = 45.0\text{MPa}$ - $f_{ck} = 39\text{MPa}$

3PBTs su travette intagliate (EN 14651-5)



Concrete designation	$f_{R1,k}$	$f_{R3,k}$	Classification (MC2010)
	[MPa]	[MPa]	
FRCD25	1.26	2.43	1d
FRCG25	4.56	4.07	4b

Three Point Bending Test (3PBT)

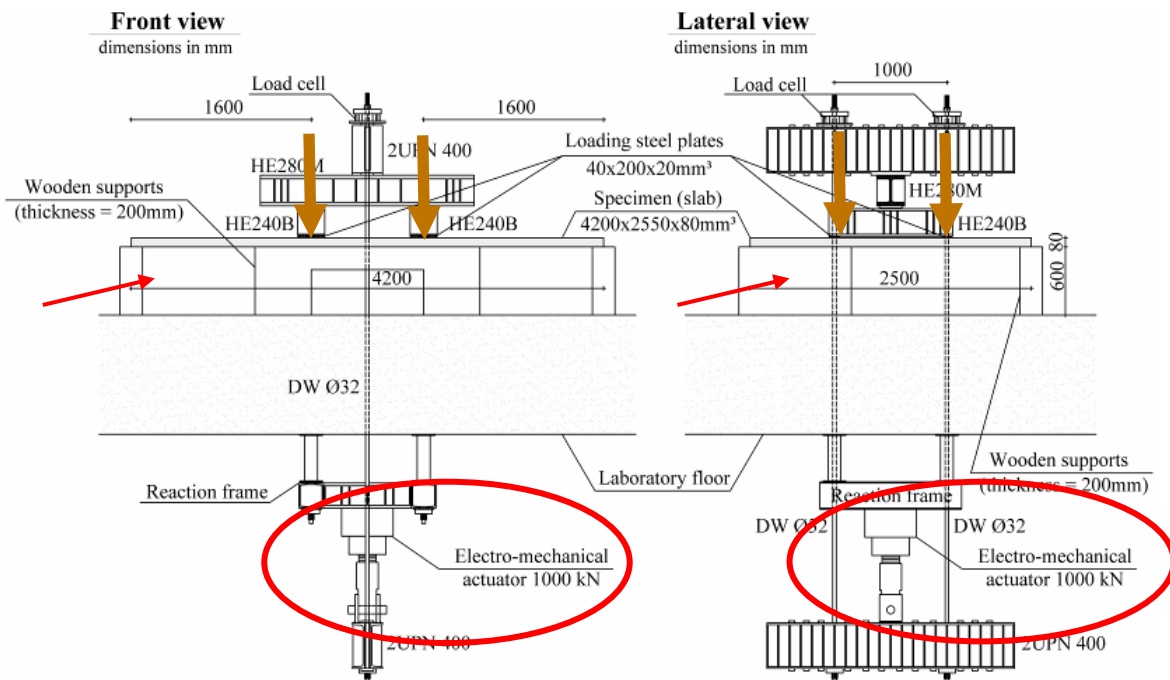


Prove su piastre senza foro: proprietà del banco di prova

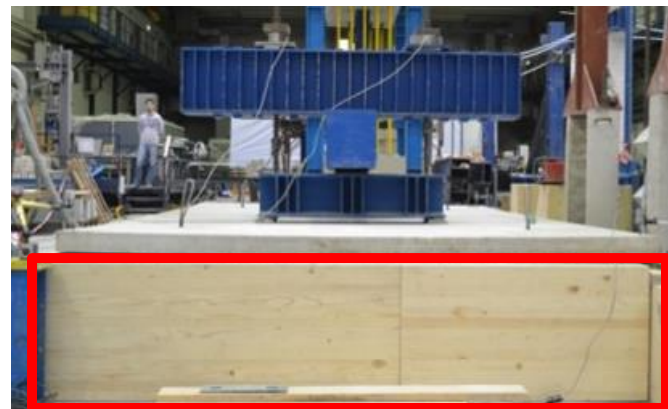
Caratteristiche del banco di prova:

- 4 punti di carico posti a distanza di 1m (prescrizioni ENEL – DG10062)
- Piastra in semplice appoggio su supporti in legno aventi larghezza 200mm
- Prova svolta in controllo di spostamento, applicando il carico in modo monotono fino a rottura

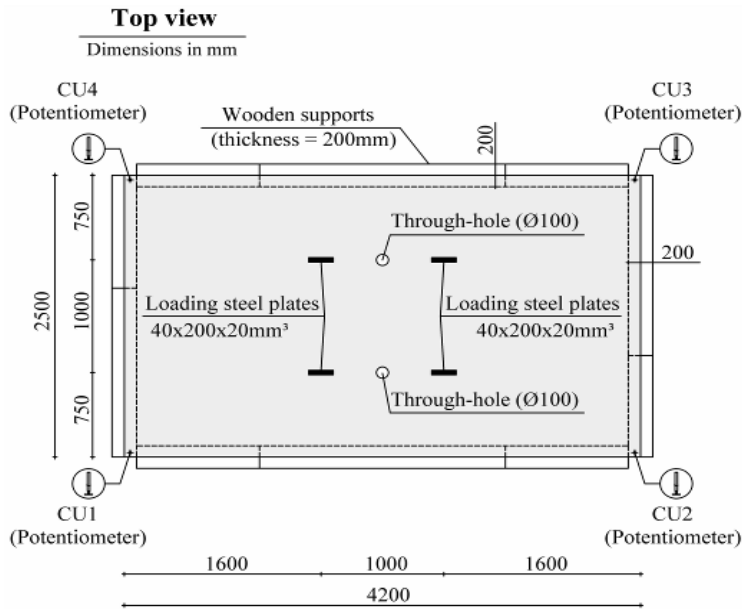
Schematizzazione del banco di prova



Vista del banco di carico

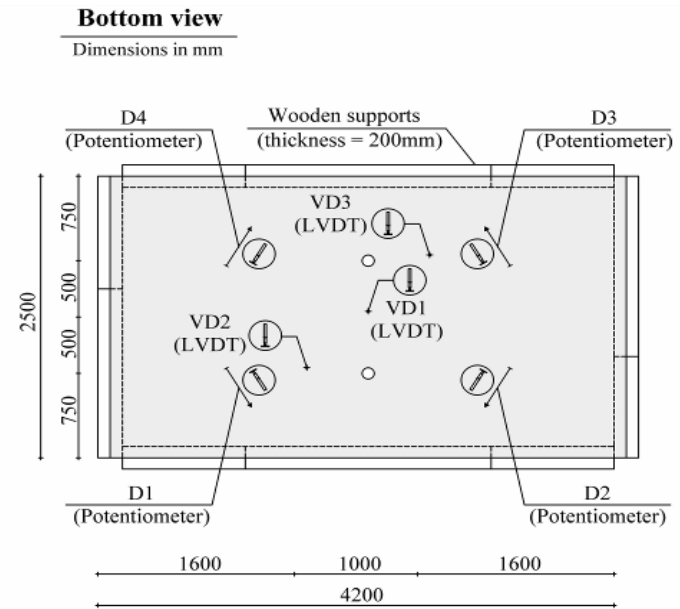
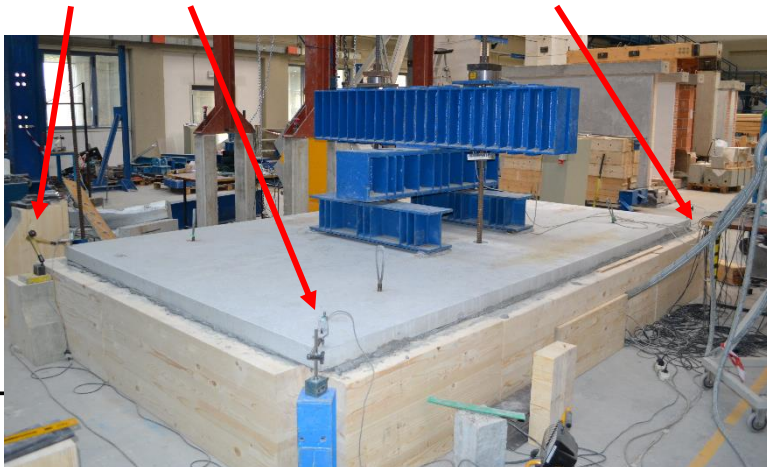


Prove su piastre senza foro: strumentazione



Vista dall'alto

Potentiometers (CU) for measuring corners uplift



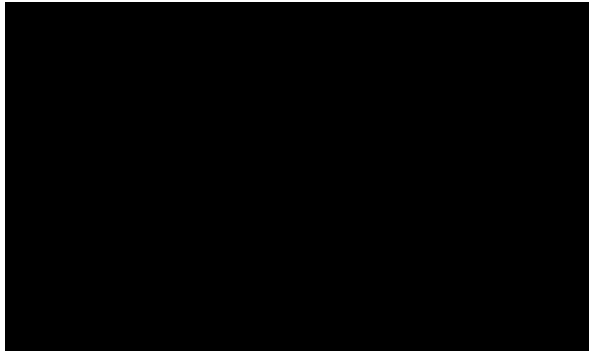
Vista dal basso

LVDTs for detecting vertical displacement

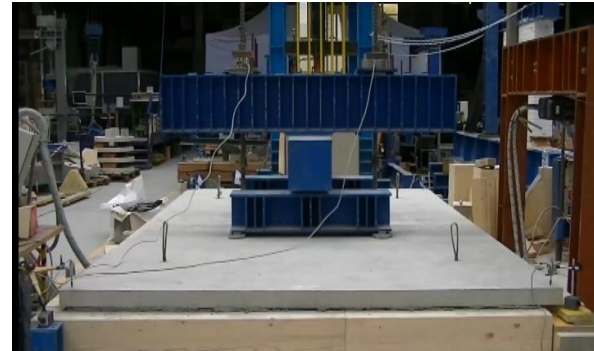
Potentiometers (D) along the 4 diagonals



Prove su piastre senza foro: time-lapse della prova



1. Vista Frontale



2. Vista Laterale



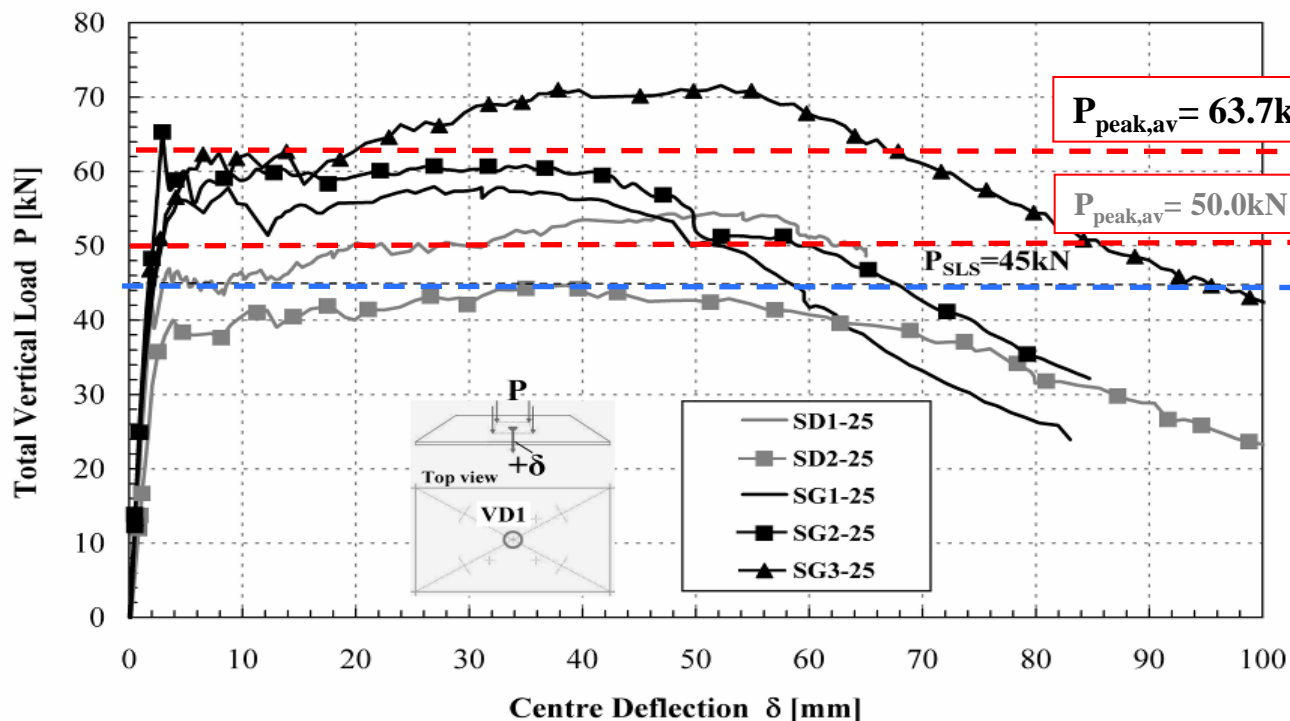
3. Particolare spigolo



4. Particolare intradosso, zona centrale

Prove su piastre senza foro: risultati principali

Total Vertical Load - Slab Centre Deflection



Coefficiente di sicurezza globale γ :

$$\gamma = \frac{P_{peak,av}}{P_{SLS}}$$

N.B.: Il carico d'esercizio ($P_{SLS}=45\text{kN}$) coincide con il peso convenzionale di un trasformatore elettrico

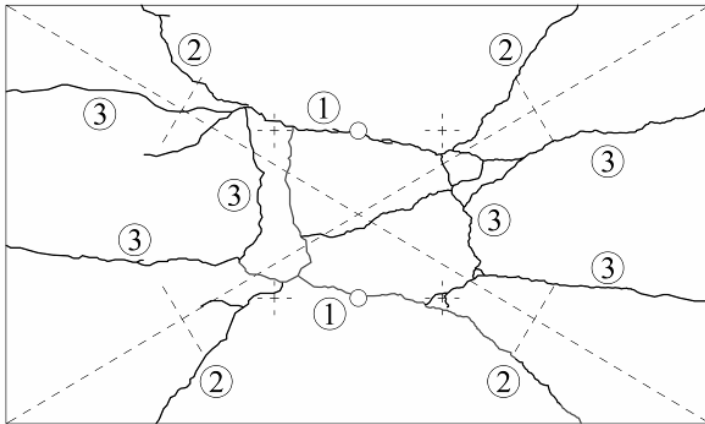
Sintesi dei risultati principali

SPECIMEN	P_{peak}	δ_{peak}	P_{peak} (mean)
	[kN]	[mm]	[kN]
SD1-25	55	54.13	50.0
SD2-25	45	37.32	
SG1-25	58	27.67	63.7
SG2-25	61	34.23	
SG3-25	72	51.73	

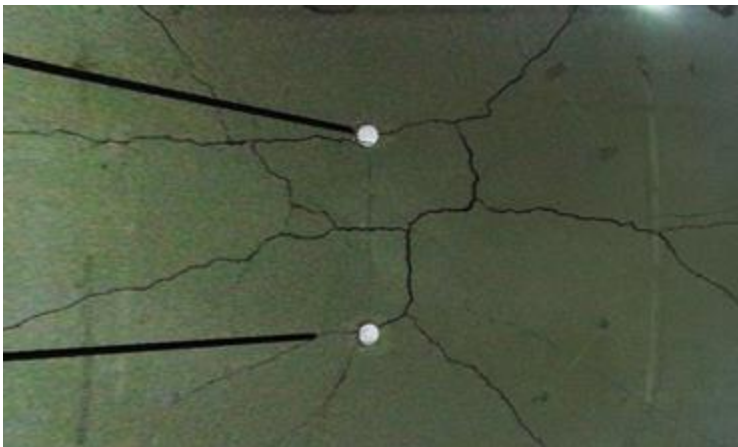
Prove su piastre senza foro: quadri fessurativi finali

Typical crack pattern of a "SD" type slab

Pre-existing cracks —
Final crack pattern —

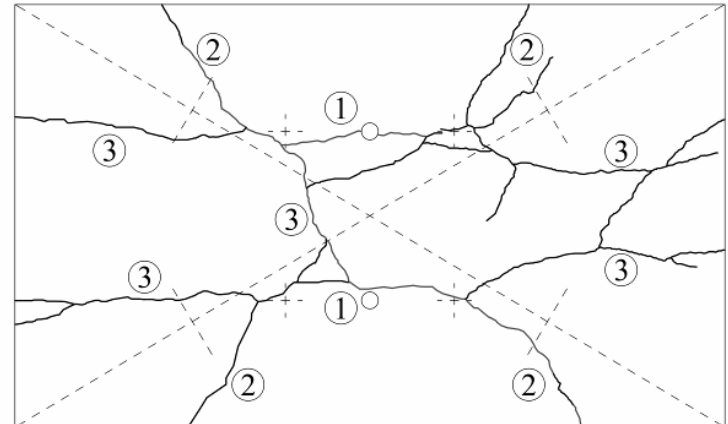


Bottom view

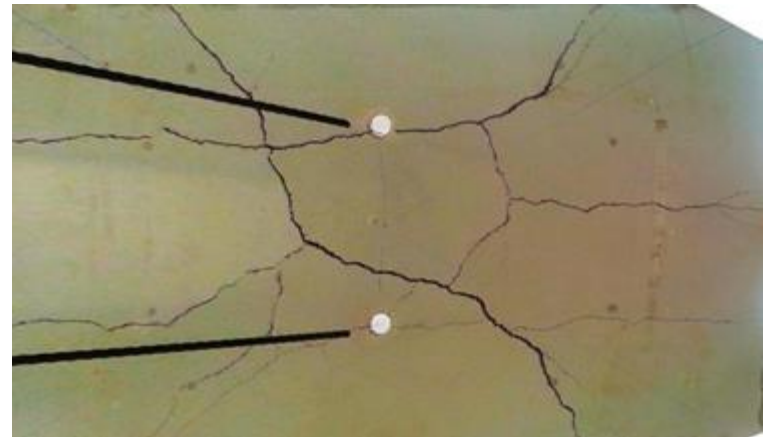


Typical crack pattern of a "SG" type slab

Pre-existing cracks —
Final crack pattern —



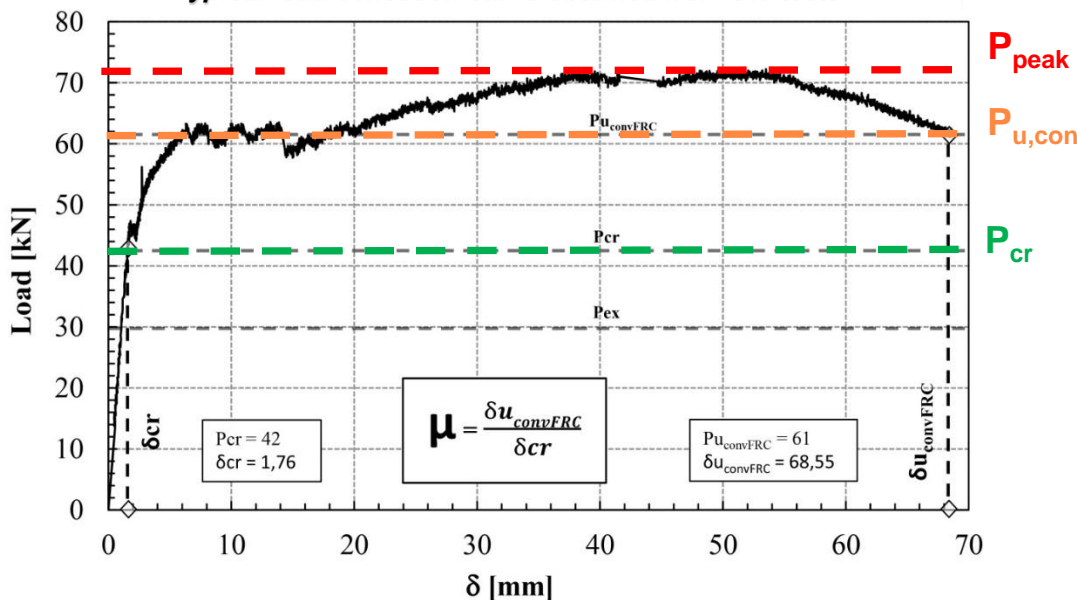
Bottom view



Prove su piastre senza foro: duttilità dell'elemento strutturale

Valutazione della duttilità globale della struttura

Typical load-deflection curve obtained from the tests



$$P_{u,con} = 0.85 P_{peak}$$

$$\delta_{u,con} = \text{displacement at } P_{u,con}$$

P_{cr} = load at first cracking disp. δ_{cr}

Indice di duttilità:

$$\mu = \frac{\delta_{u,con} - \delta_{cr}}{\delta_{cr}}$$

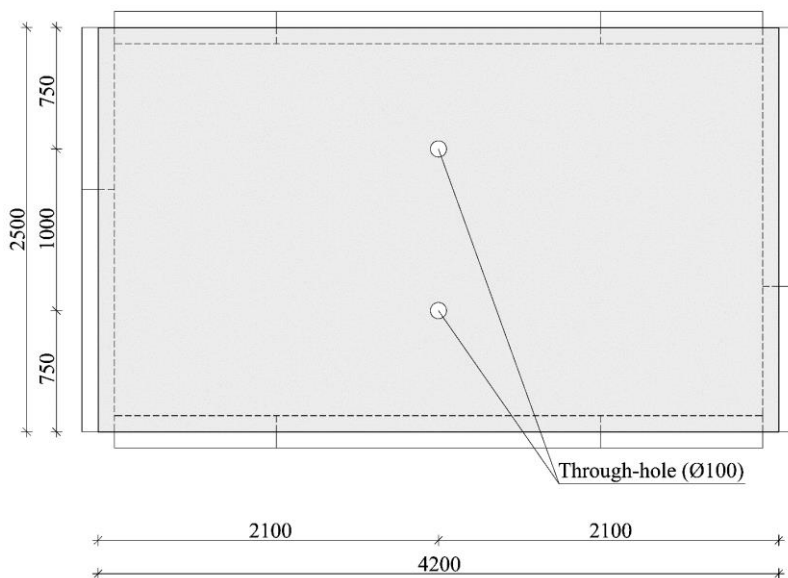


SPECIMEN	P_{cr}	δ_{cr}	P_{peak}	δ_{peak}	$P_{u,con}$	$\delta_{u,con}$	$\mu_{u,con}$	$\mu_{u,con}$ (mean value)
	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[-]	[-]
SD1-25	42	1.98	55	54.1	47	68.2	34	32
SD2-25	31	2.40	45	37.3	38	69.0	29	
SG1-25	30	1.39	58	27.7	46	57.1	56	42
SG2-25	40	1.73	61	2.9	52	50.0	28	
SG3-25	42	1.76	72	51.7	58	74.8	42	

Prove su piastre senza foro: confronto fra SFRSCC (solo fibre) e C.A.

Piastra in SFRSCC

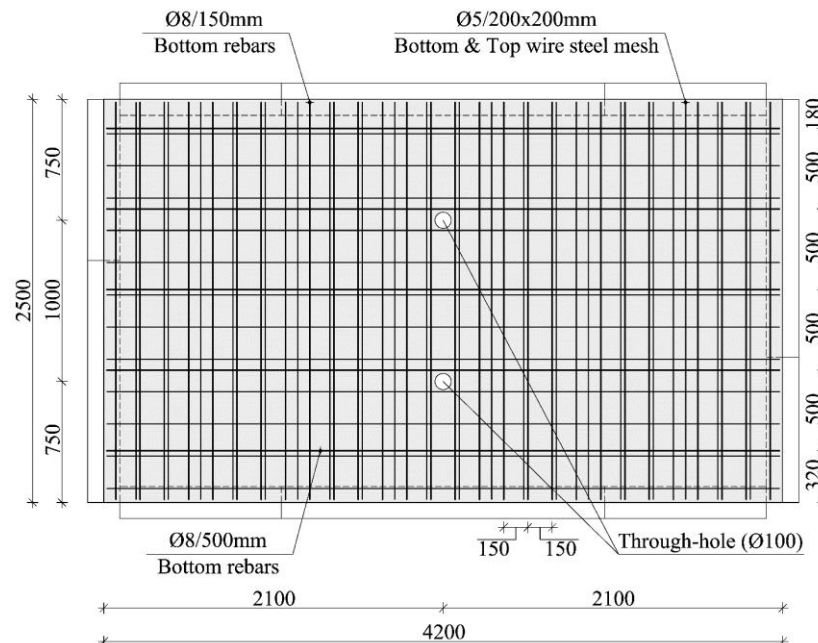
Slabs SG & SD
Dimensions in mm



**Contenuto totale di armatura
(solo fibre) = 25kg/m³**

Piastra in C.A.

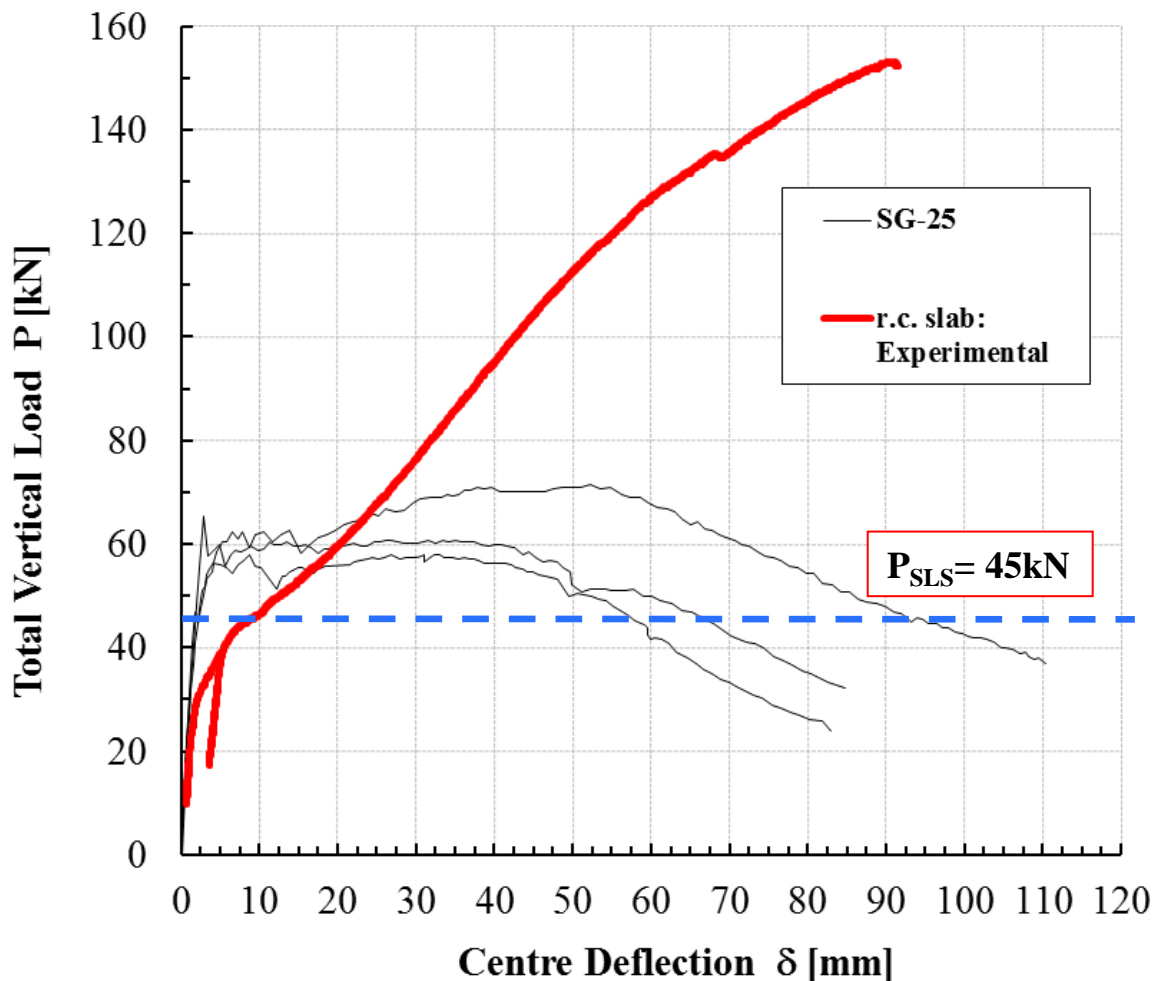
Slab SPC
Dimensions in mm - Clear cover = 15mm



**Contenuto totale di armatura =
77kg/m³**

Prove su piastre senza foro: confronto fra SFRSCC (solo fibre) e C.A.

Vertical load - Center deflection



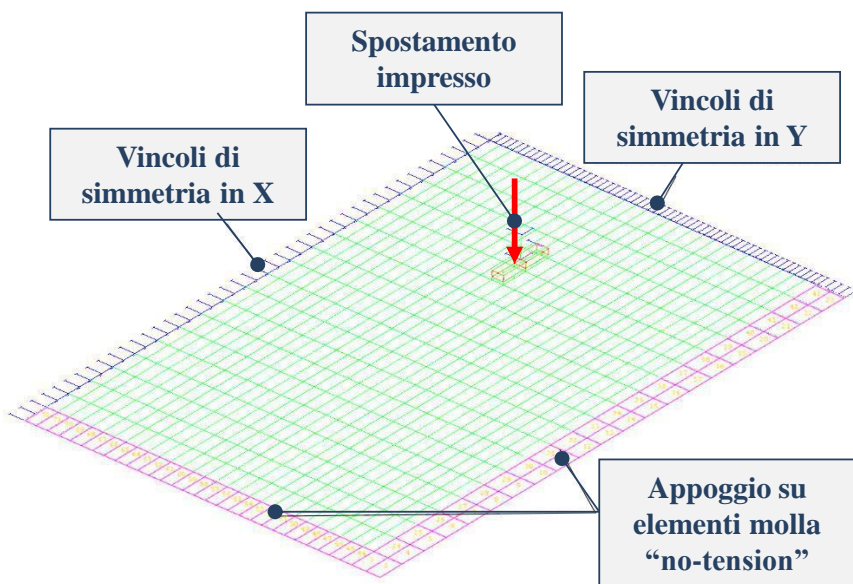
Simulazione numerica delle piastre: modello agli elementi finiti

Analisi numerica non-lineare 3D delle piastre testate - programma utilizzato DIANA 9.6

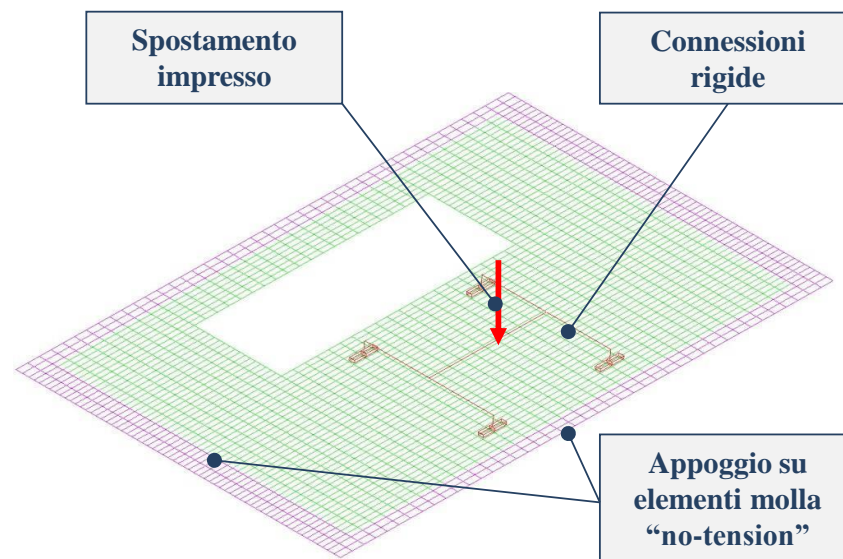
Modello FEM con elementi tipo **“Curved Shell”**

Condizioni di vincolo

Piastre senza foro



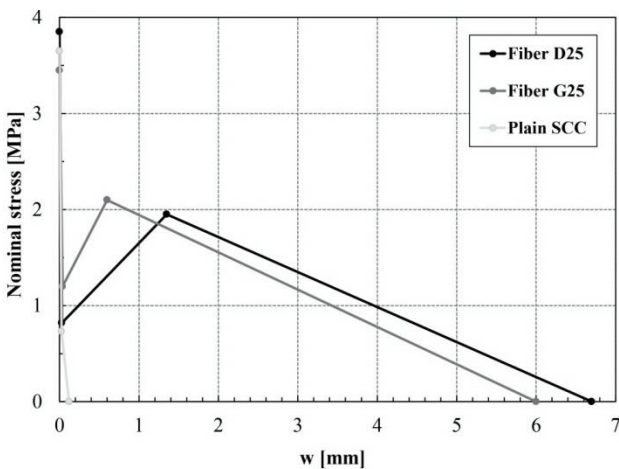
Piastre con foro



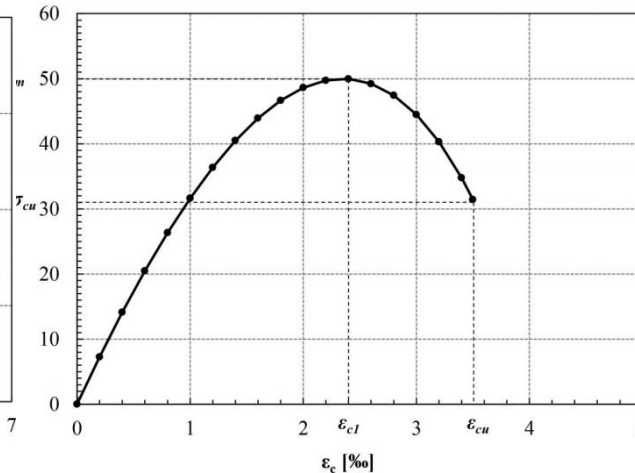
Si è modellato $\frac{1}{4}$ dell'intera piastra sfruttando la simmetria di carico e geometrica del provino testato

Modelli costitutivi implementati nelle analisi numeriche non-lineari

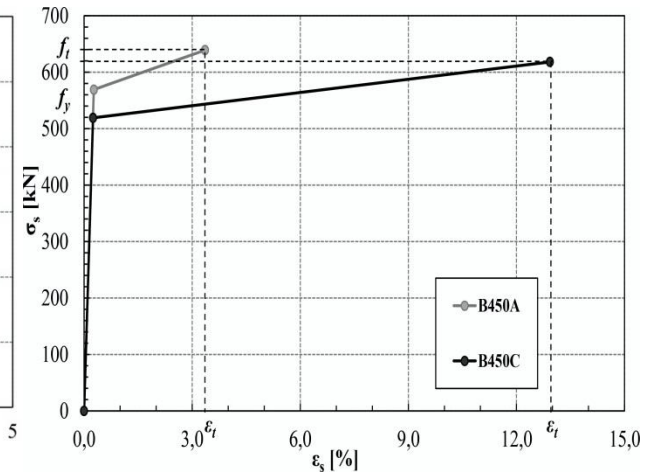
FRC - trazione



FRC o CA - compressione



Armatura (B450C o B450A)

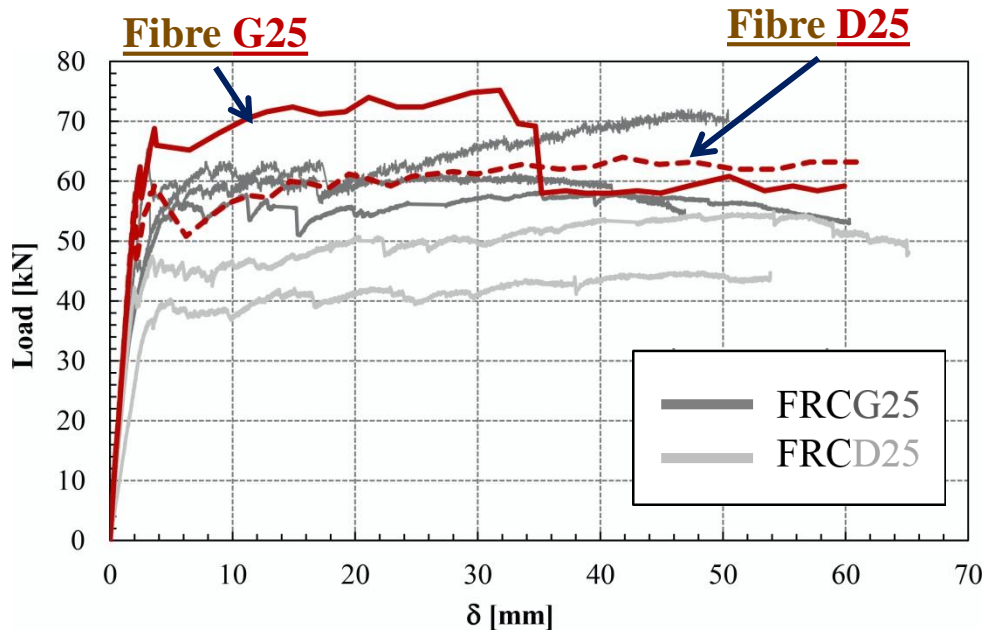


Legame costitutivo a trazione dell'FRC determinato a partire dalle prove su travette intagliate in accordo con EN 14651-5 e Model Code 2010

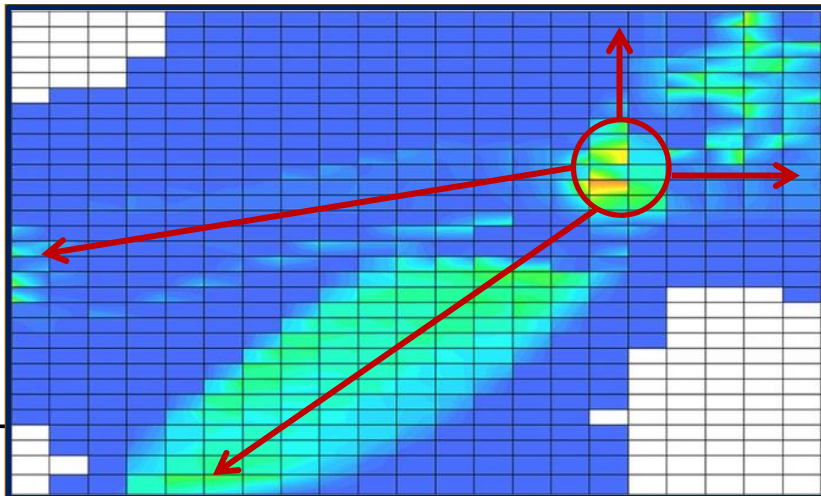
Legame costitutivo sforzo-deformazione a compressione del calcestruzzo (Model Code 2010) determinate a partire da prove di compressione monoassiale su cubi

Legame costitutivo sforzo-deformazione (Model Code 2010) delle armature tradizionali determinate a partire dalle prove di trazione monoassiale

Simulazione numerica delle piastre: calibrazione del modello



Quadro fessurativo numerico

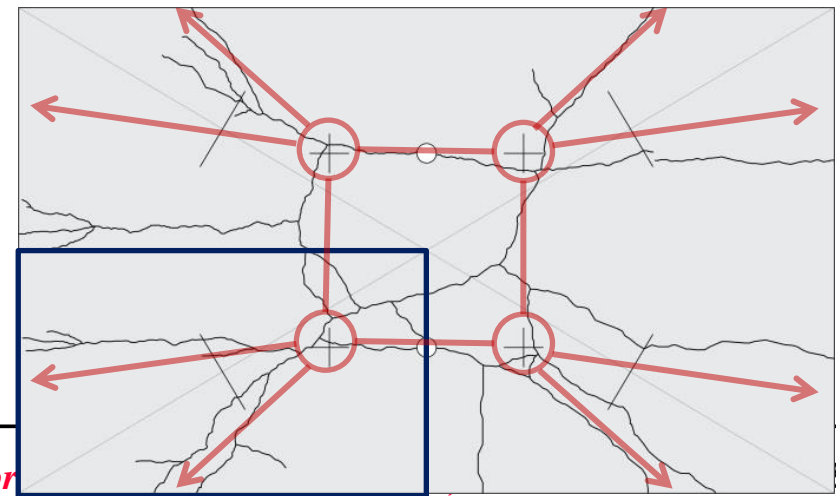


Piastre senza foro

- ❖ Buona approssimazione del ramo elastico iniziale
- ❖ Accettabile sovrastima della capacità massima



Quadro fessurativo sperimentale



Fibron

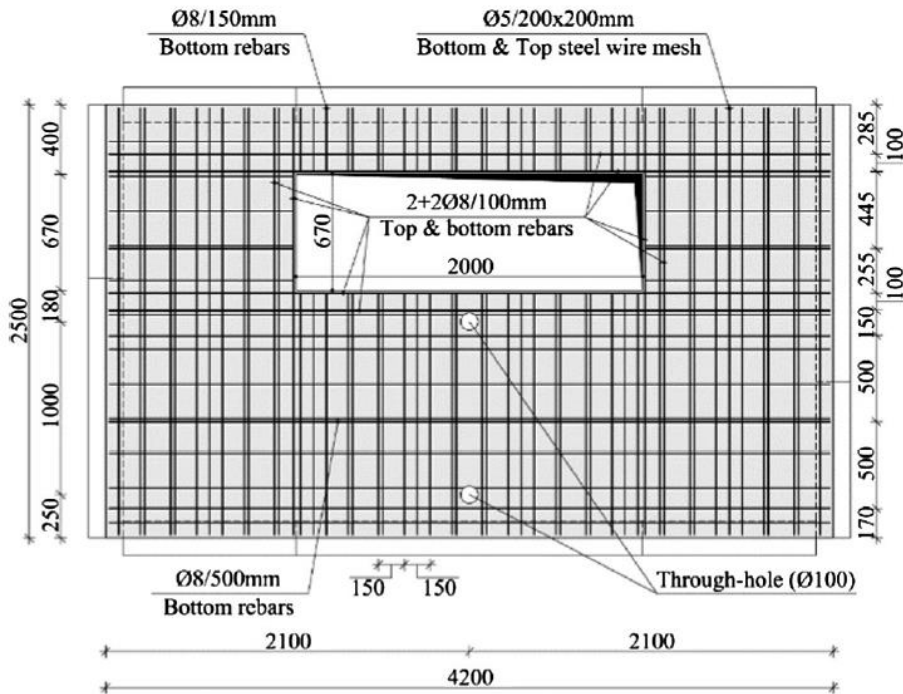
Ottimizzazione dell'armature nelle piastre con foro

**Armatura tradizionale
(SPC-O)**

**SFRSCC (25kg/m³) + Armatura
(SG25-O)**

Slab SRC-O

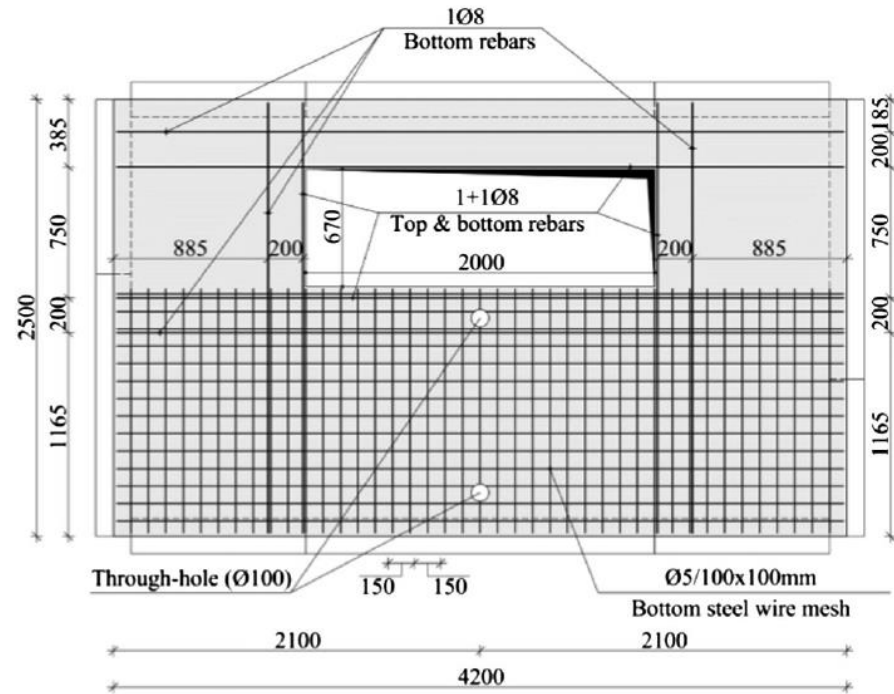
Dimensions in mm - Clear cover = 15mm



Incidenza armatura = 91kg/m³

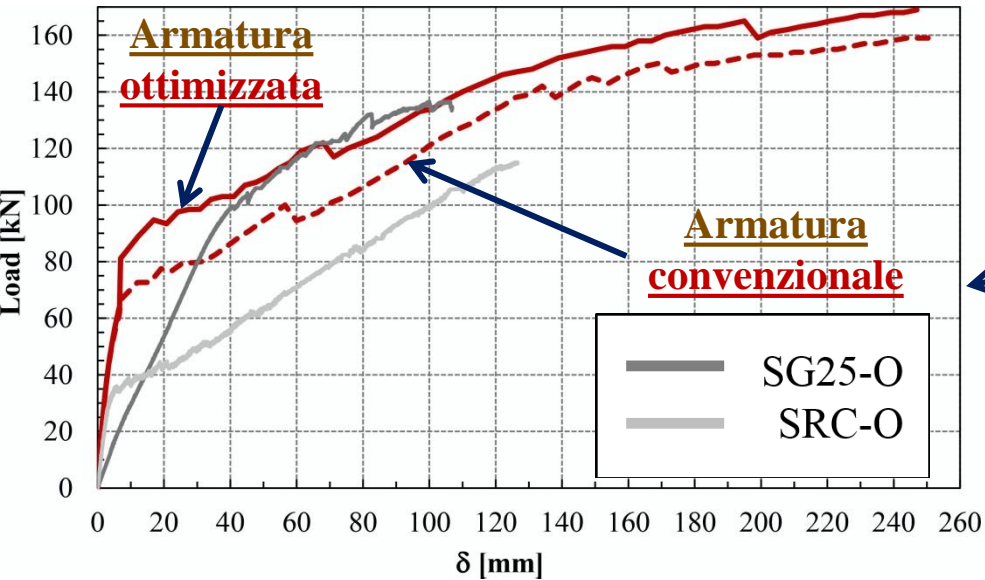
Slab SG-25-O

Dimensions in mm - Clear cover = 15mm



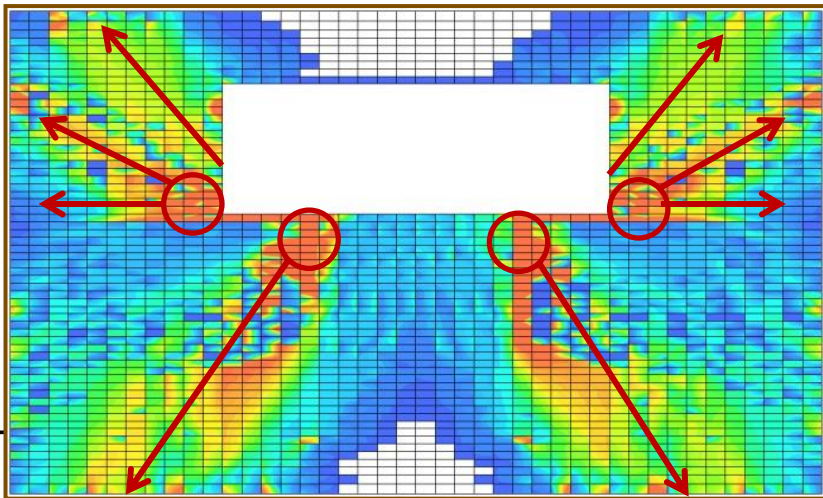
Incidenza armatura + fibre = 68kg/m³

Simulazione numerica delle piastre con foro

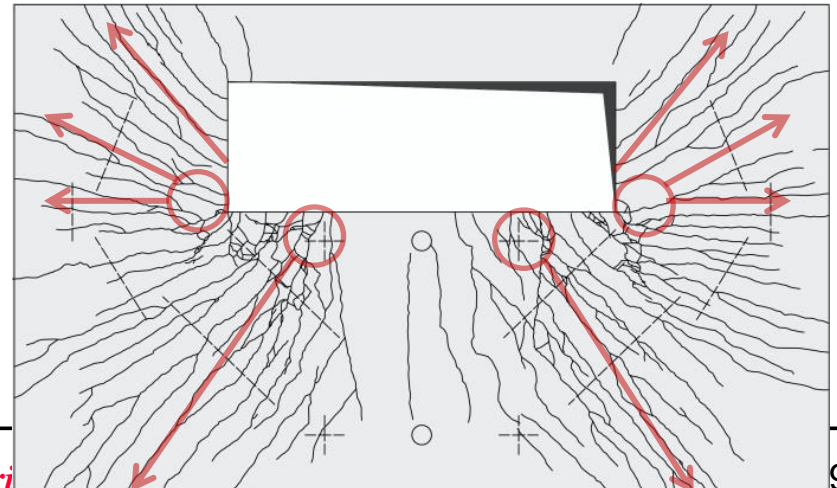


- ❖ L'analisi numerica evidenzia come la piastra con armatura ibrida (fibre+armatura) sia caratterizzata da una capacità portante simile a quella della piastra in C.A. e un comportamento in esercizio migliore di quest'ultima.
- ❖ La previsione numerica ha sovrastimato del 20% il comportamaneto sperimentale

Quadro fessurativo numerico



Quadro fessurativo sperimentale

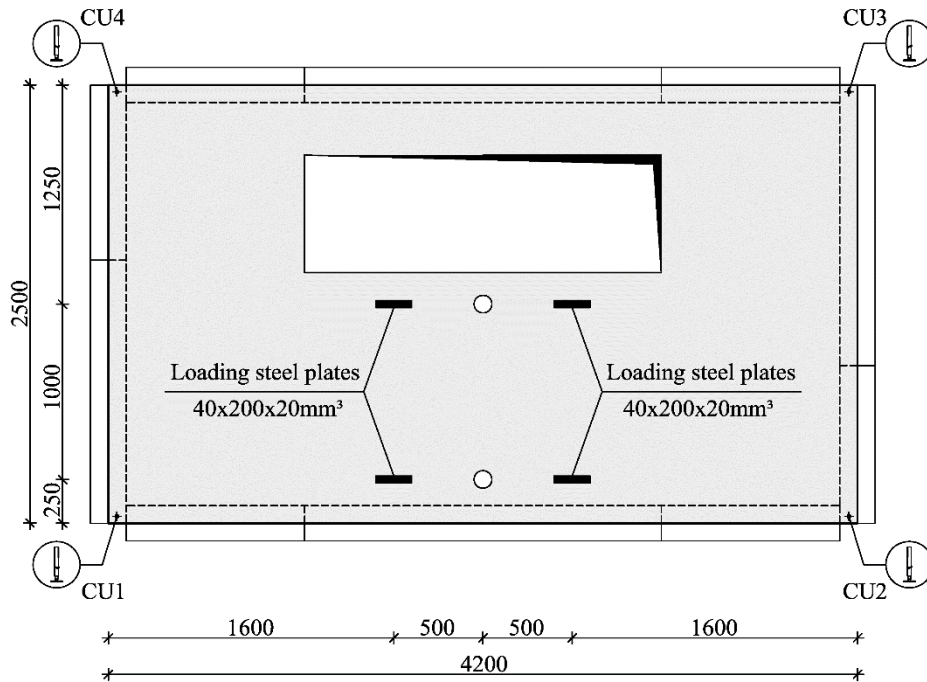


Prove su piastre con foro: set-up di prova

Strumentazione e punti di carico

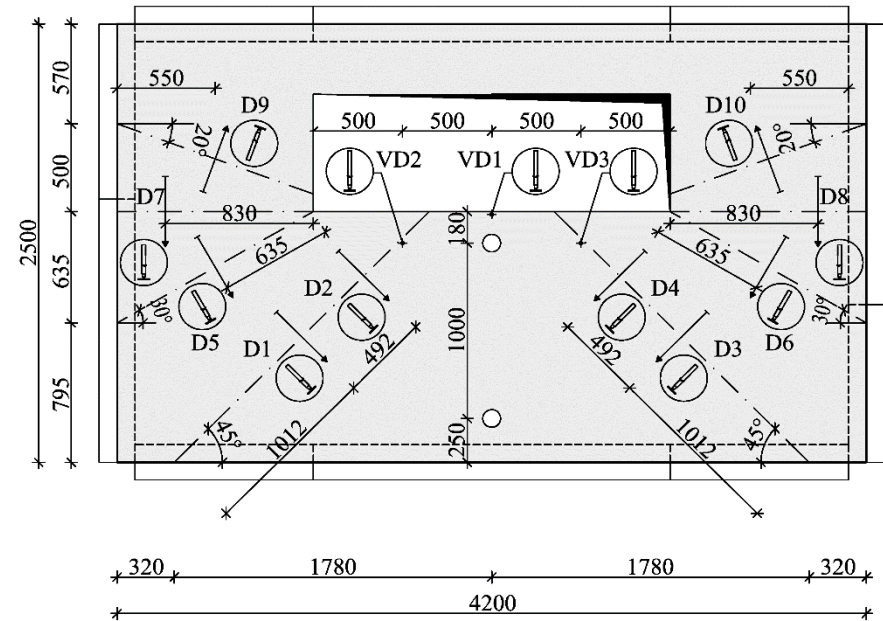
Top view

Dimensions in mm



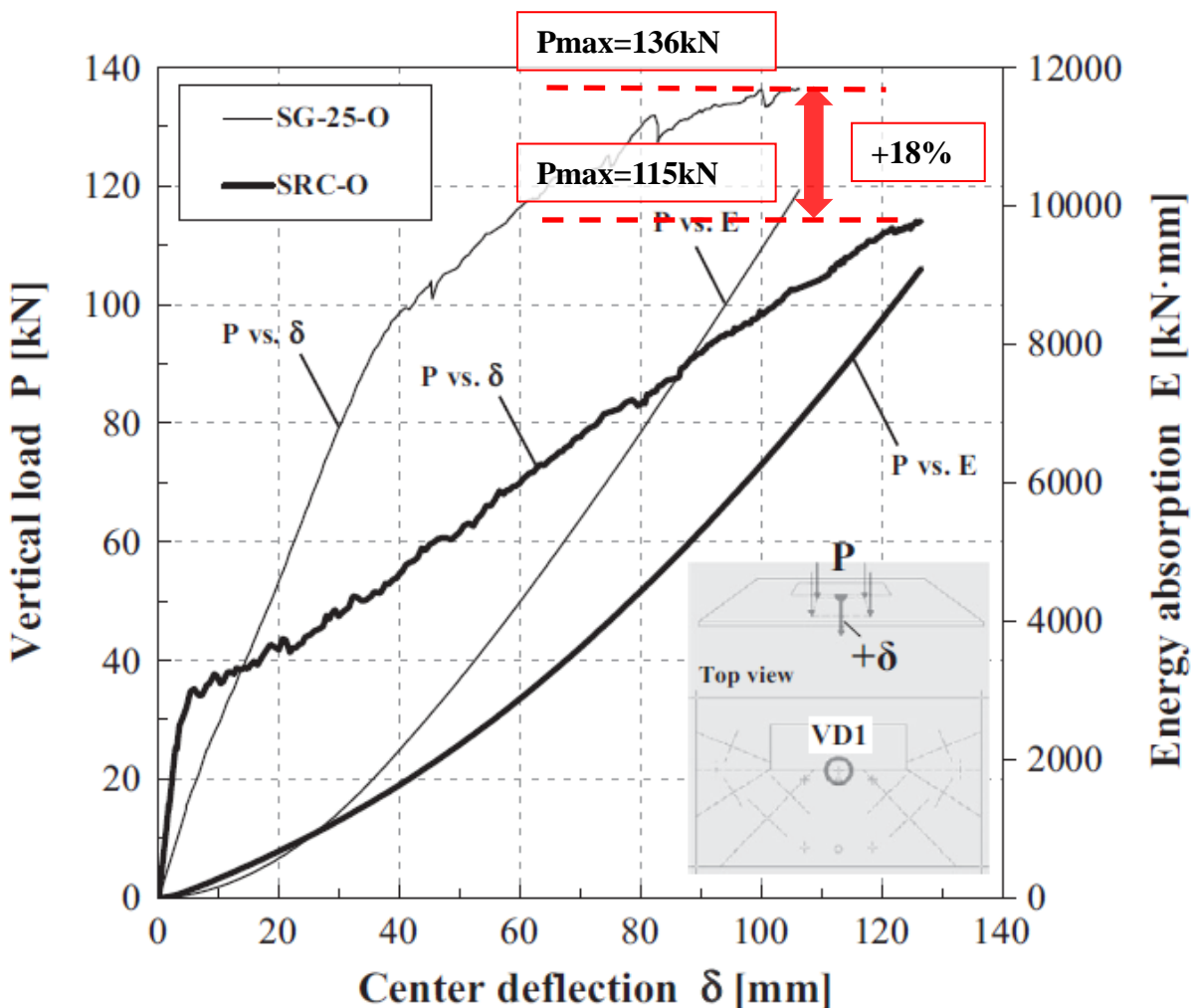
Bottom view

Dimensions in mm



Prove su piastre con foro: principali risultati

Curve Carico - Abbassamento ($P-\delta$) e Carico - Energia assorbita ($P-E$)

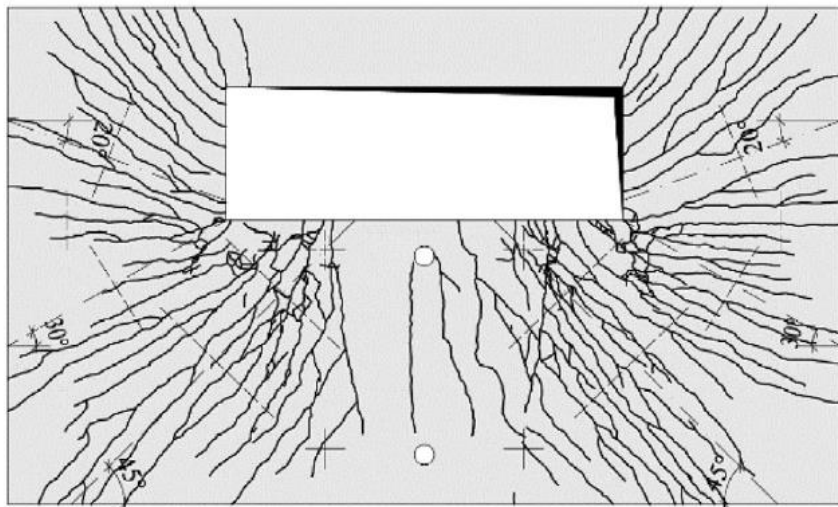


Prove su piastre con foro: principali risultati

Quadri fessurativi a rottura

**Armatura tradizionale
(SPC-O)**

SRC-O



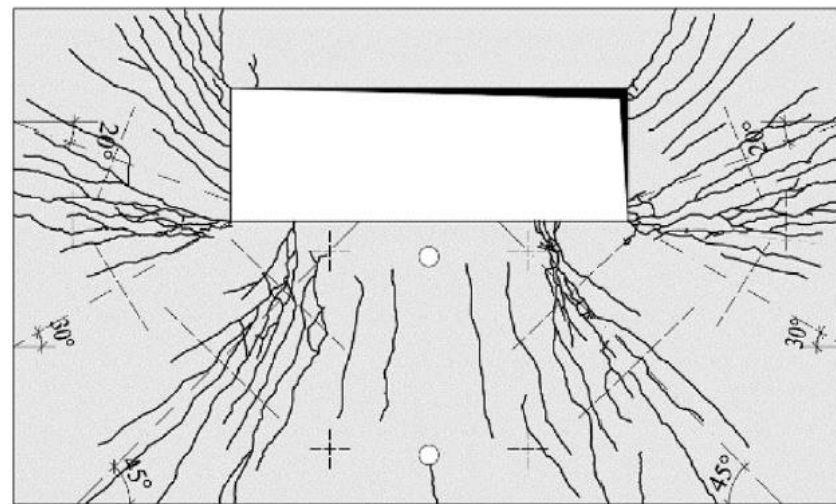
FRONT



SIDE

**SFRSCC (25kg/m³) + Armatura
(SG25-O)**

SG-25-O



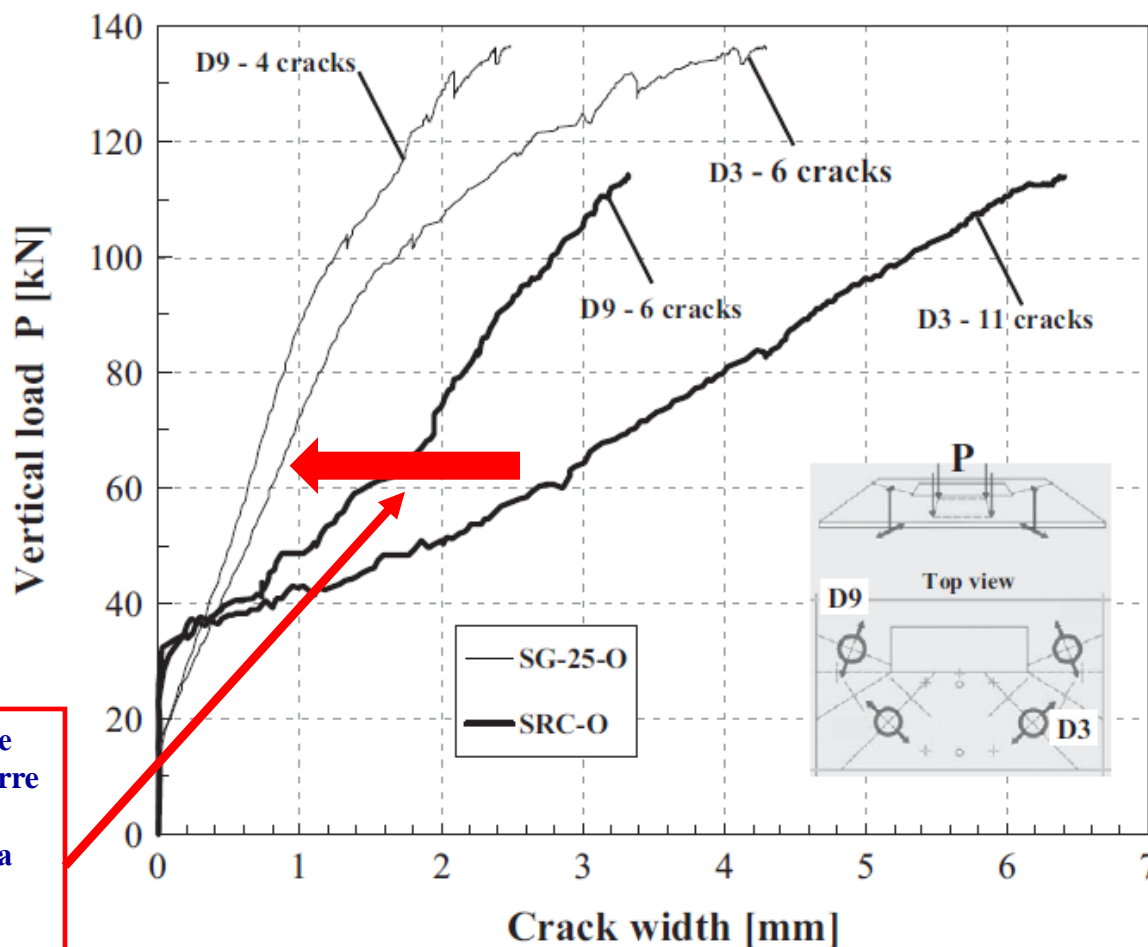
FRONT



SIDE

Prove su piastre con foro: principali risultati

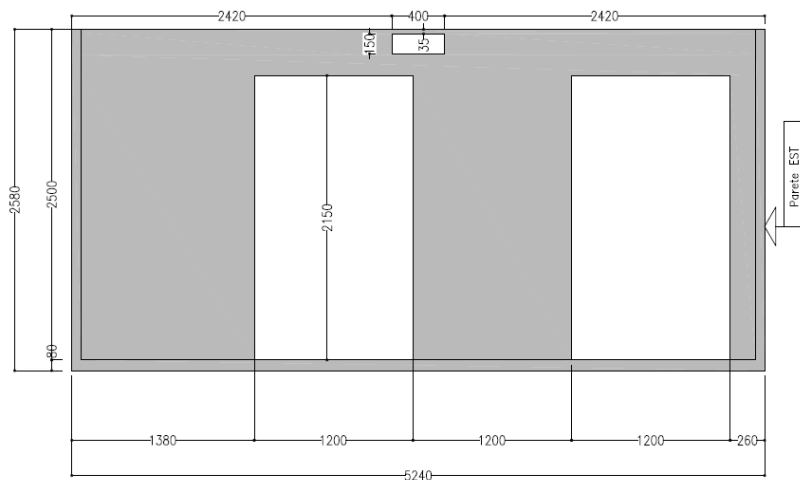
Massime aperture di fessura rilevate



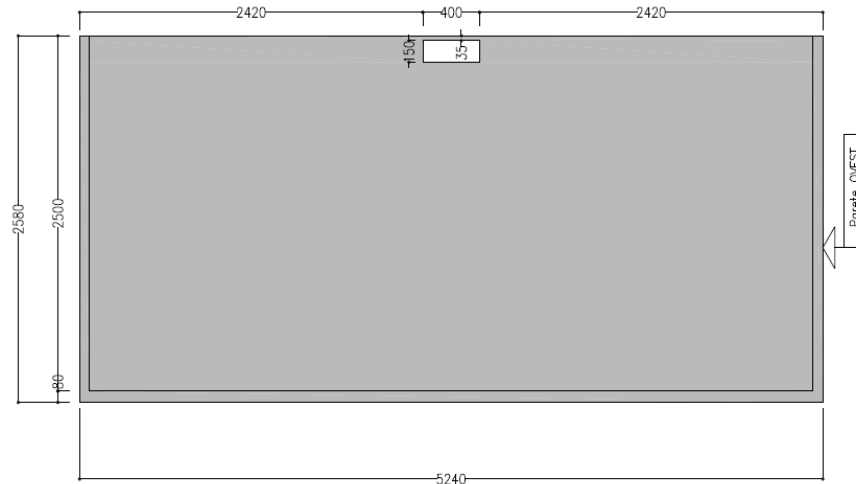
N.B.: l'impiego delle fibre consente di ridurre significativamente l'apertura di fessura rilevata a parità di carico applicato

Prove su cabine monoblocco: caratteristiche geometriche del provino

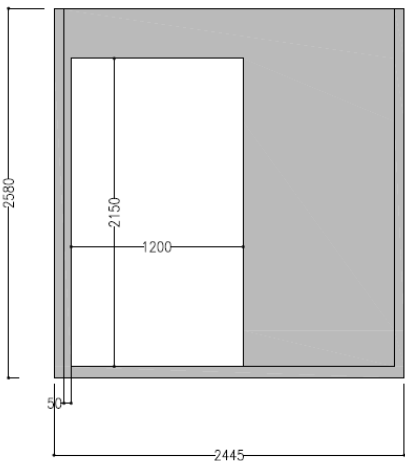
Parete SUD



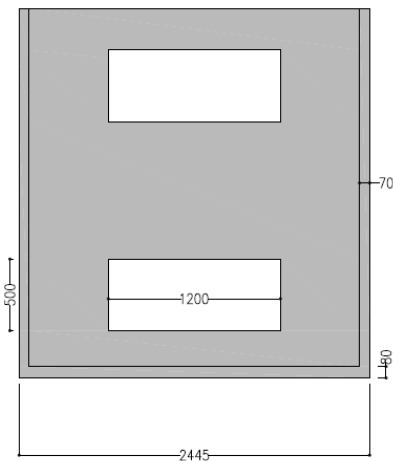
Parete NORD



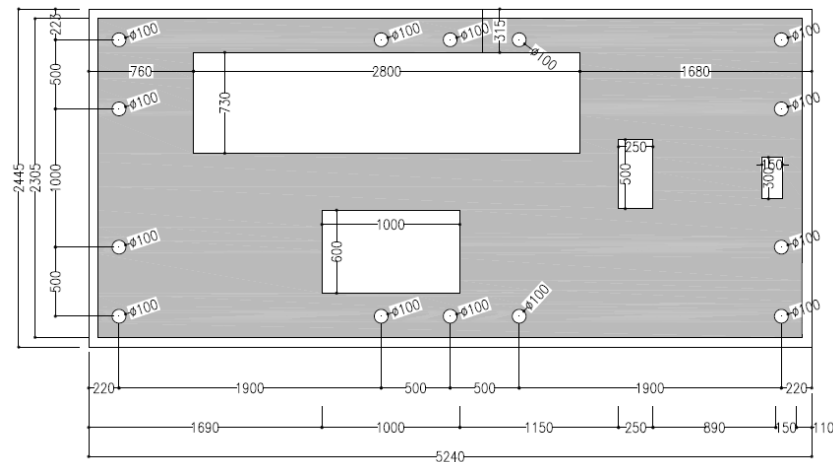
Parete OVEST



Parete EST

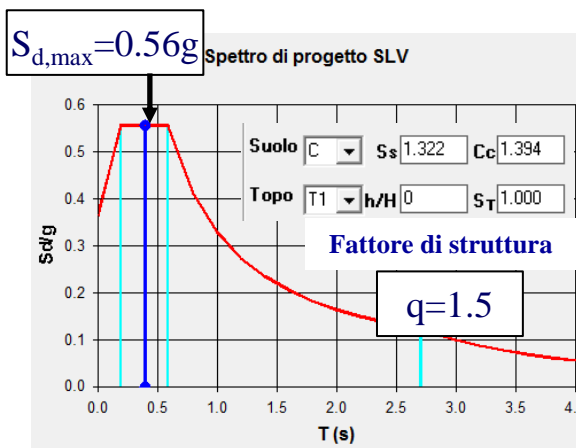
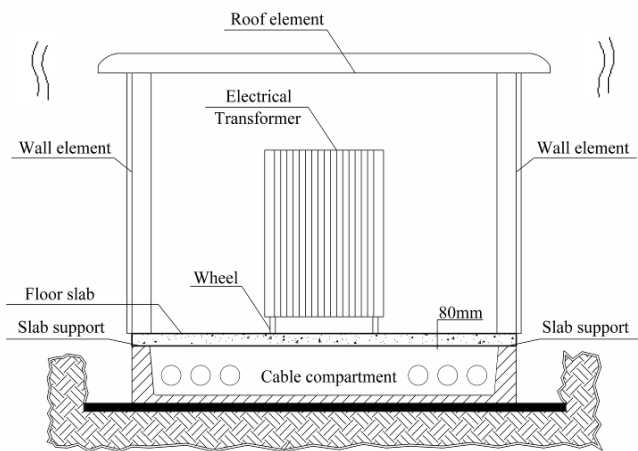


Piastra di fondo (Spessore=80mm)



Prove su cabine monoblocco: azione sismica di progetto

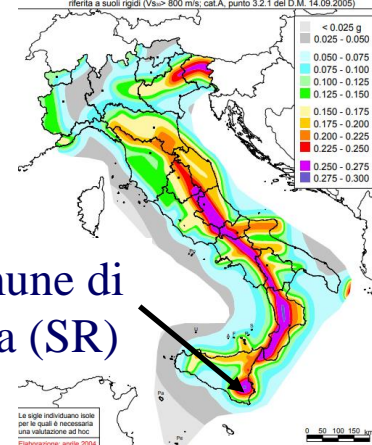
Calcolo dell'azione sismica di progetto in accordo con NTC2018



SLV=Stato Limite di Salvaguardia della Vita

Accelerazione max con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni ($T_R=475$ anni)

Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale
(riferimento: Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n.3619, All.1b)
espressa in termini di accelerazione massima del suolo
con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni
riferita a suoli rigidi ($V_{s0} > 800$ m/s; cat.A, punto 3.2.1 del D.M. 14.09.2005)



Comune di
Ferla (SR)

Calcolo delle masse associate:

$$W = G_1 + G_2 + \sum_j \Psi_{2j} Q_{kj}$$

$G_1 + G_2 = 5300 \text{ kg}$
Carico permanente

$Q = 0$
Carico variabile trascurabile
in presenza del sisma

Forza sismica di progetto :

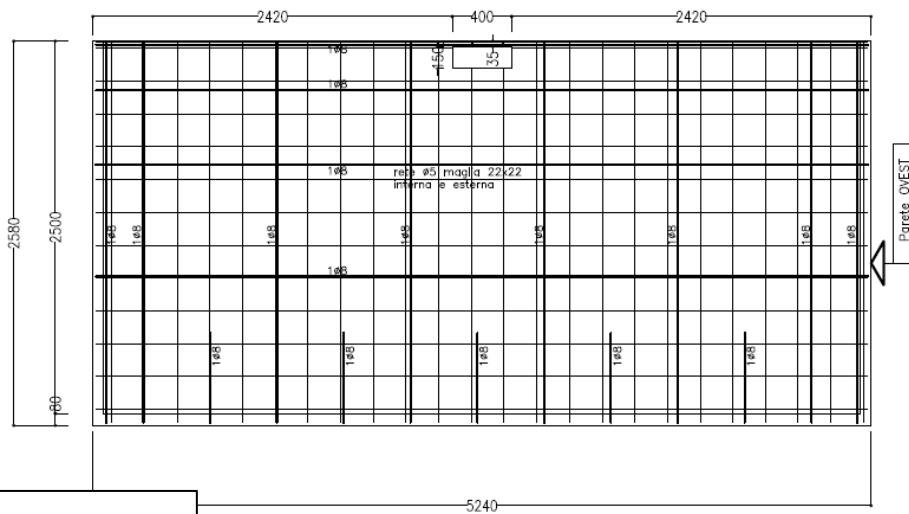
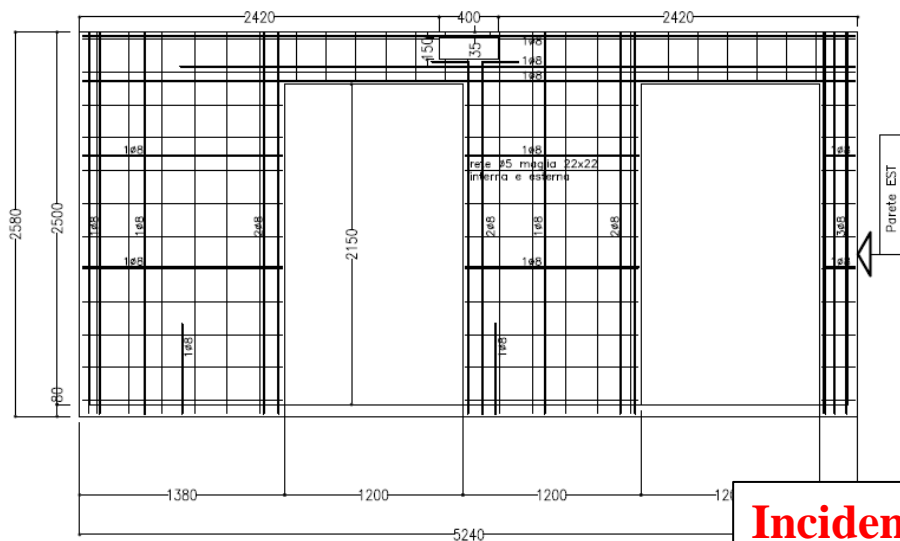
$$V_d = S_d(T_1) W \lambda/g = 29 \text{ kN}$$



Prove su cabine monoblocco: armatura tradizionale

Parete SUD

Parete NORD

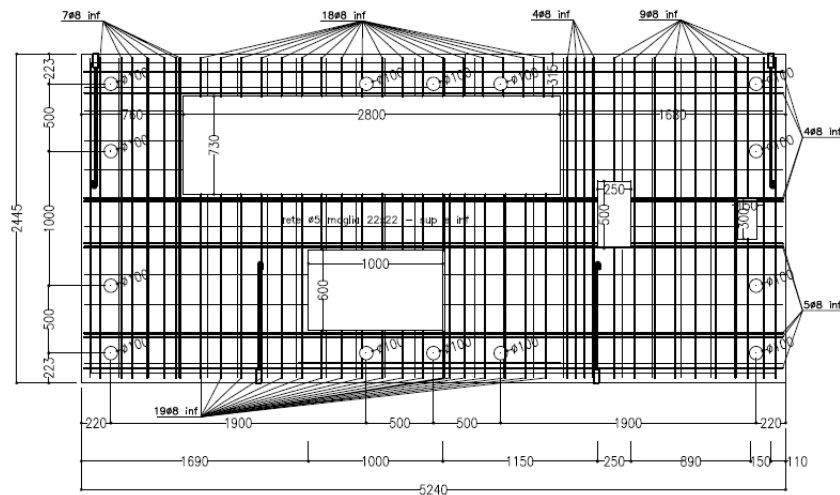
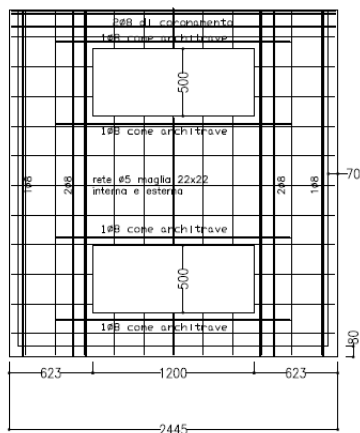
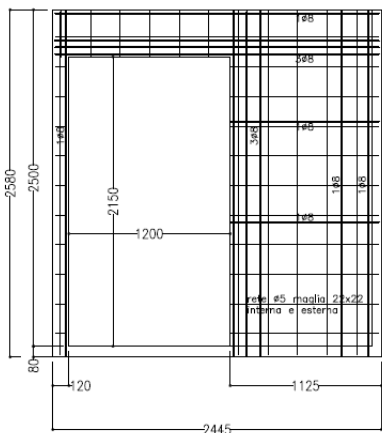


**Incidenza armatura
pareti = 70kg/m³**

Parete OVEST

Parete EST

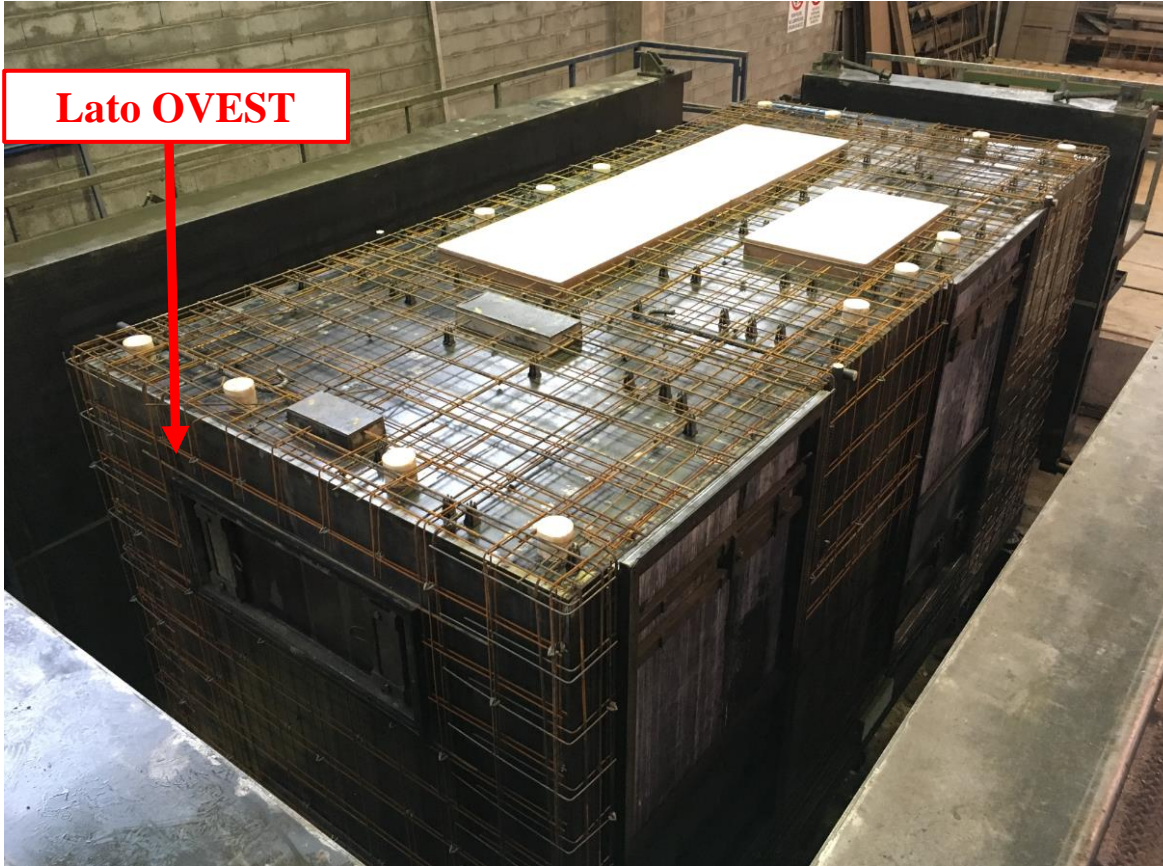
Piastra di fondo (Spessore=80mm)



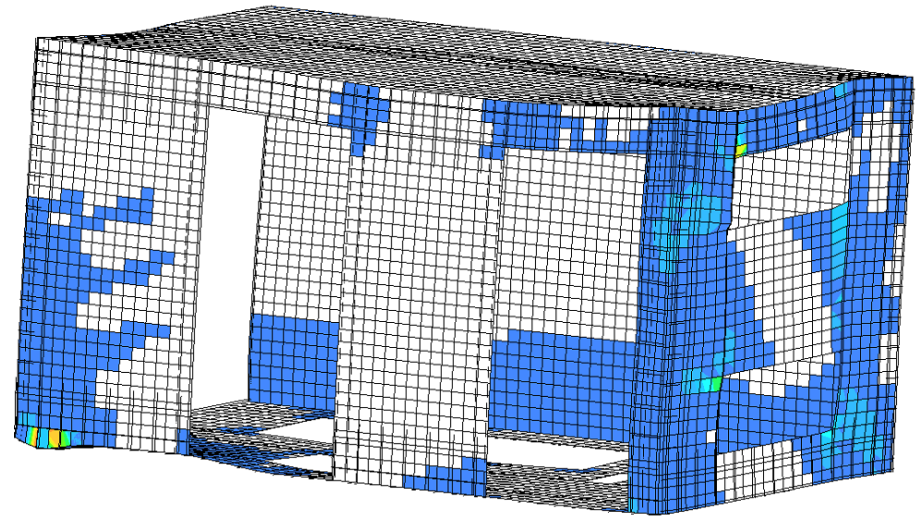
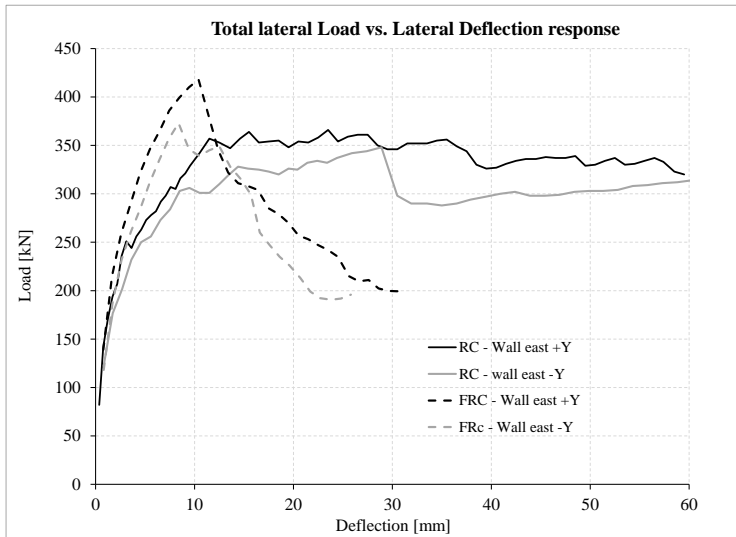
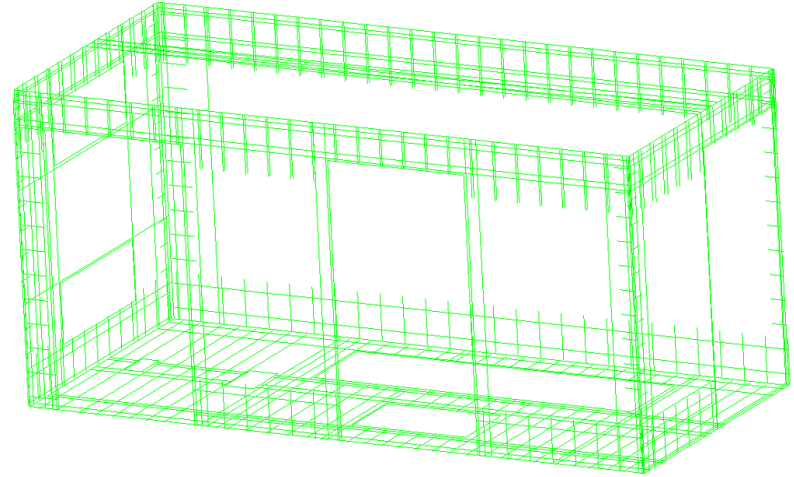
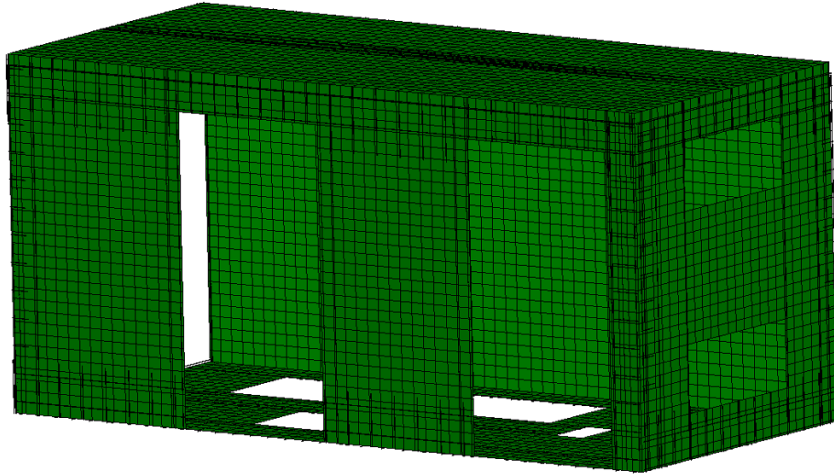
Prove su cabine monoblocco: armatura tradizionale

Lato OVEST

Lato EST



Analisi non-lineare agli elementi finiti con il programma Diana 10.1

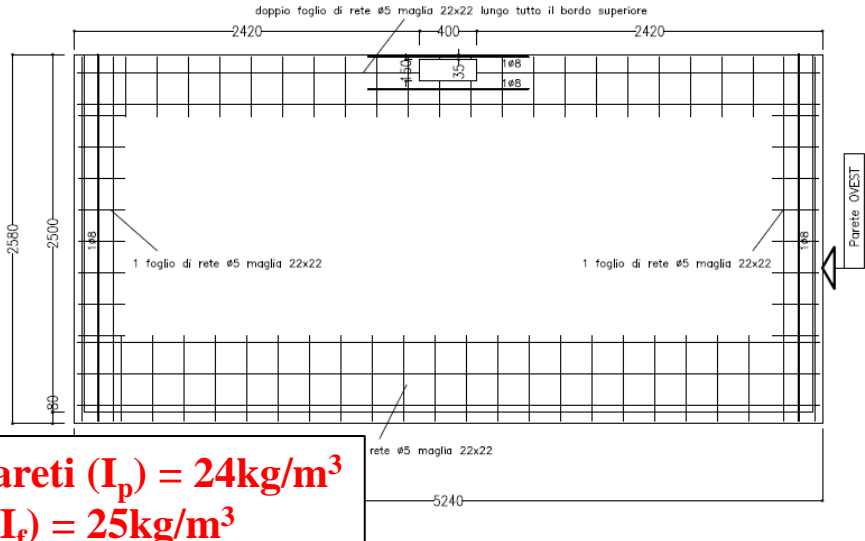
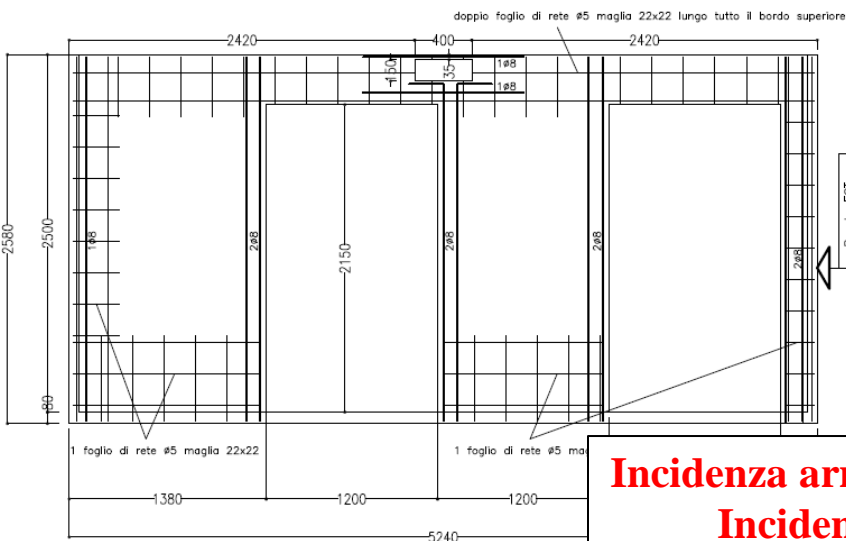




Prove su cabine monoblocco: armatura ibrida (fibre+armature)

Parete SUD

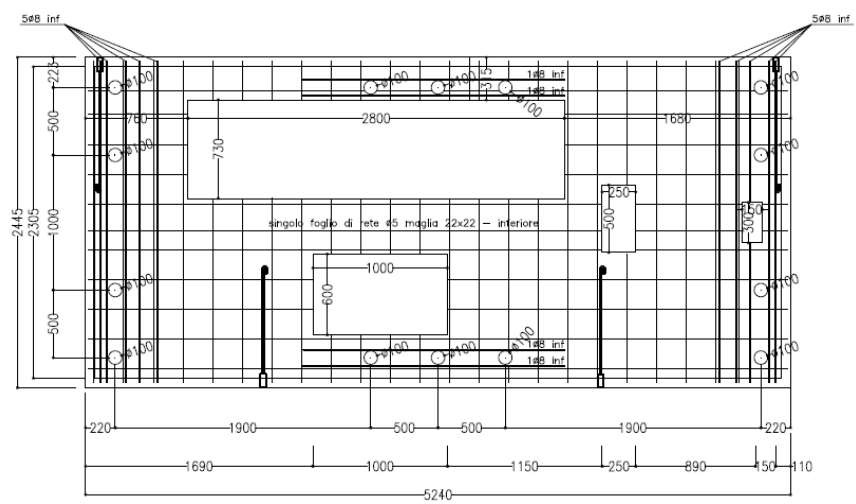
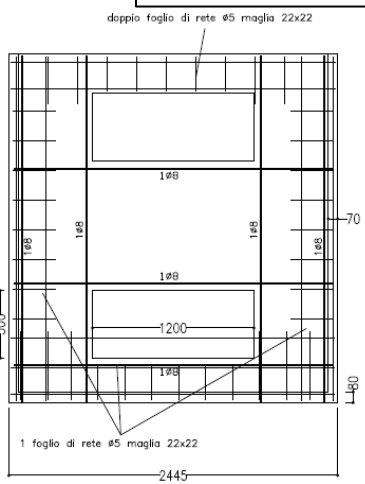
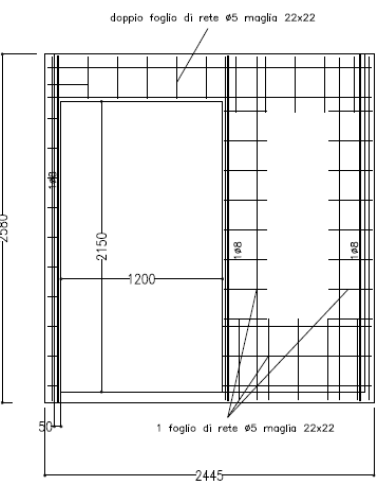
Parete NORD



Incidenza armatura pareti (I_p) = 24kg/m³
Incidenza fibre (I_f) = 25kg/m³
 $I_p + I_f = 49kg/m^3$

fondo (Spessore=80mm)

Parete OVEST



Prove su cabine monoblocco: armatura ibrida (fibre+armature)

Lato OVEST



Lato OVEST



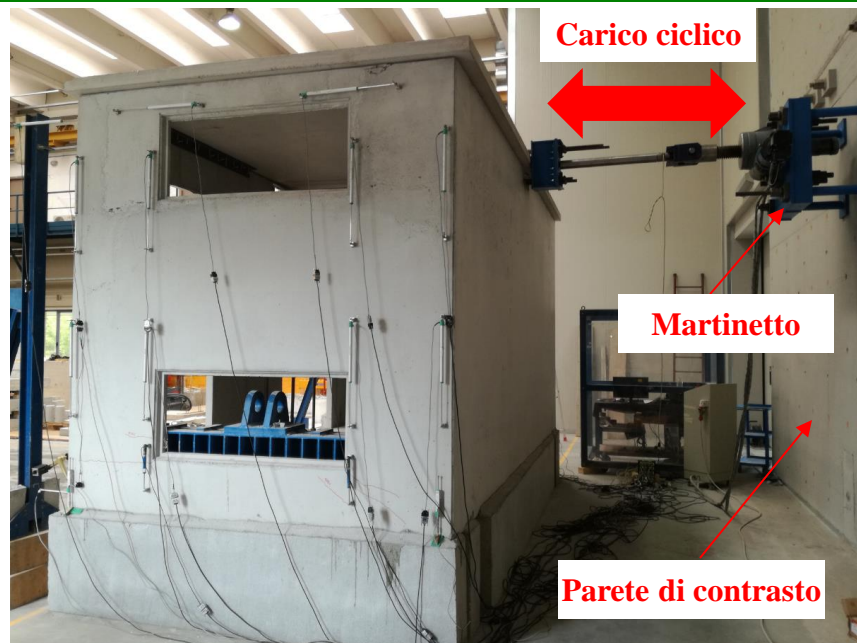
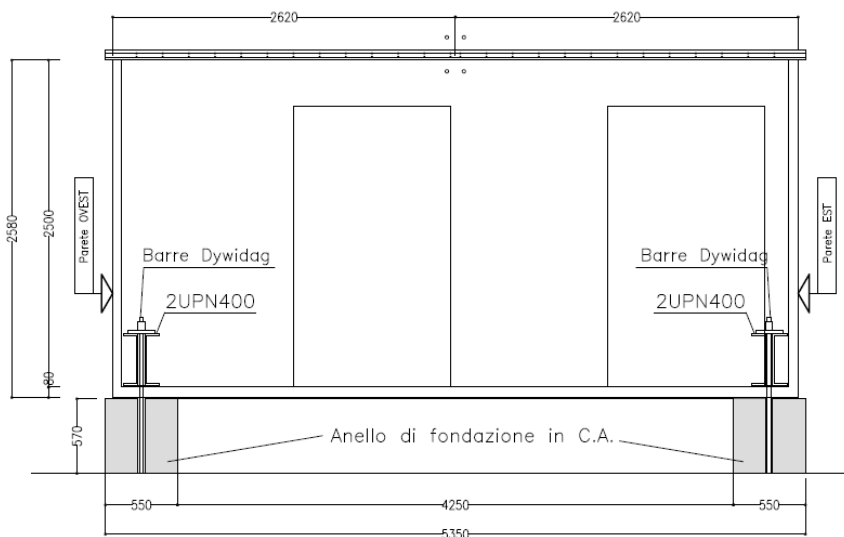
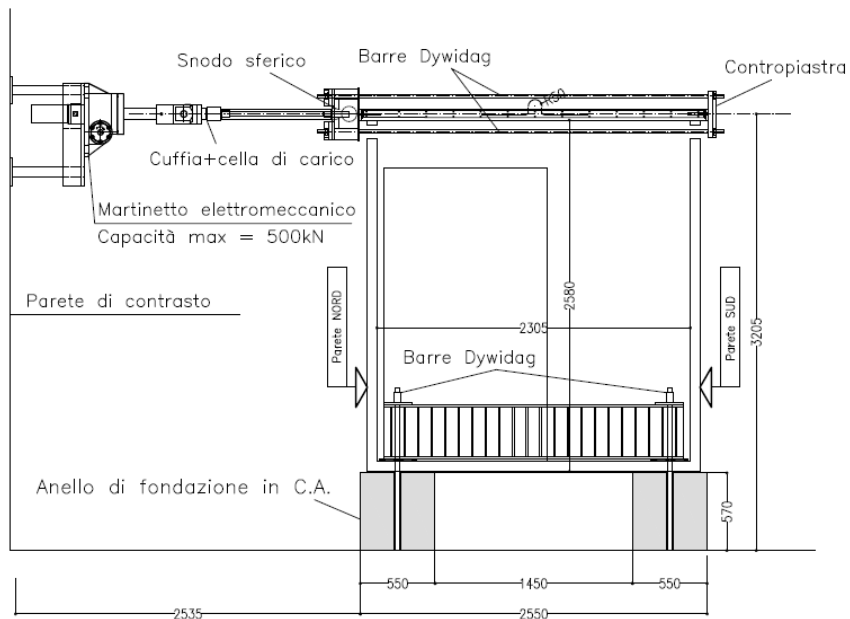
Lato EST



Lato NORD

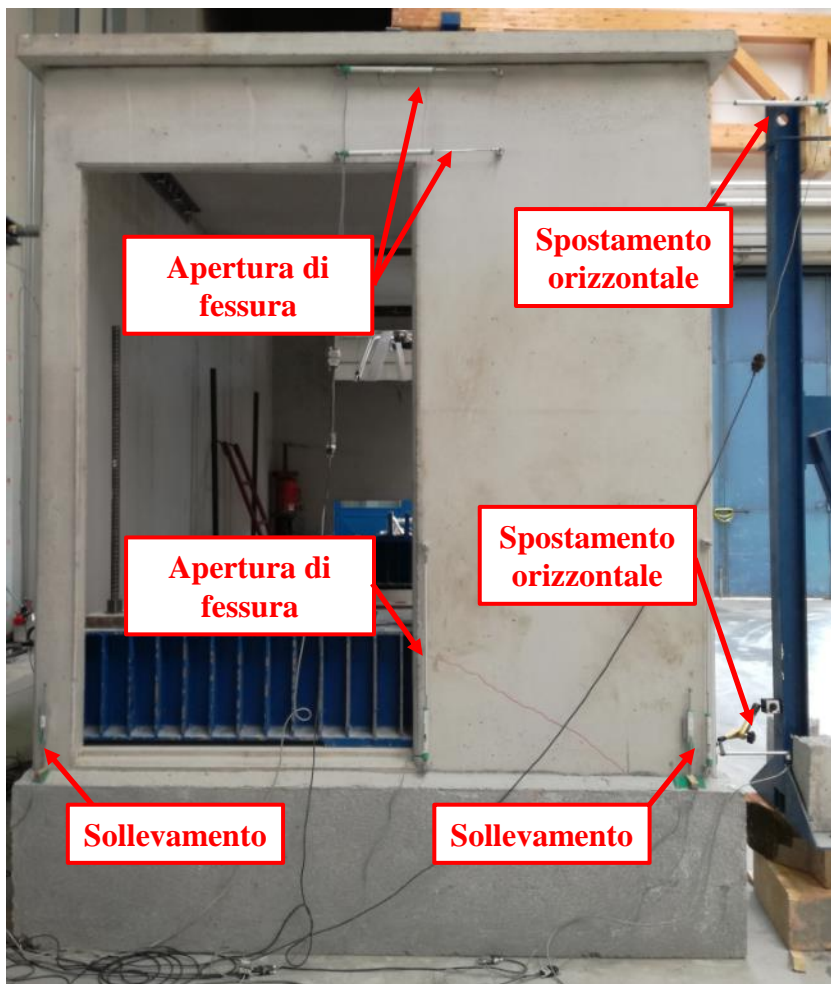


Prove su cabine monoblocco: set-up di prova

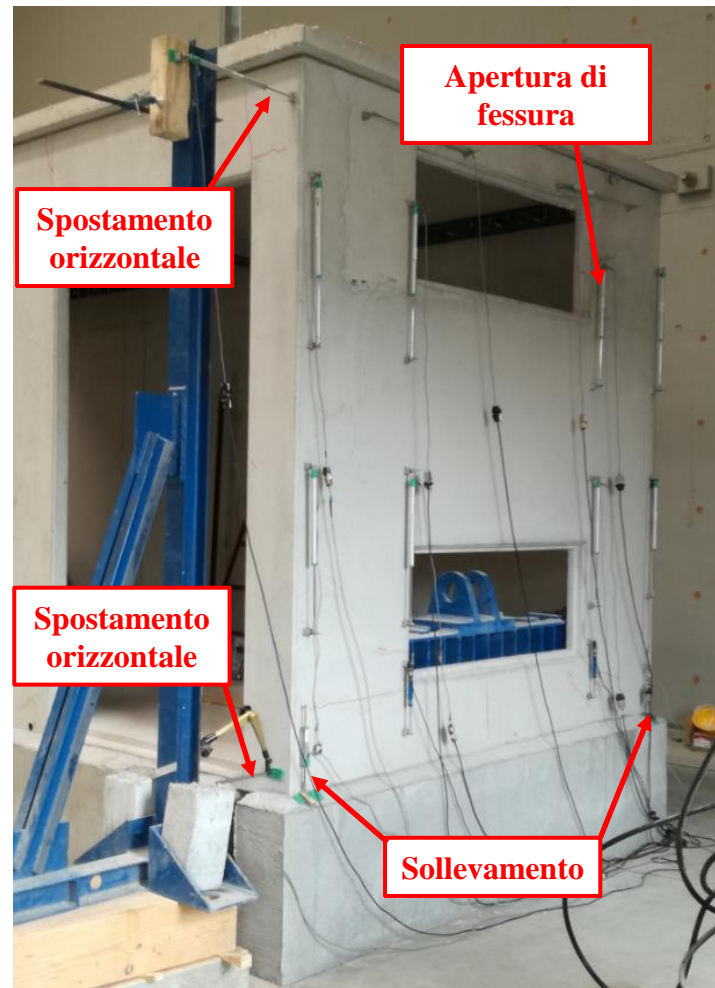


Prove su cabine monoblocco: strumentazione

Strumentazione lato OVEST



Strumentazione lato EST





Prove su cabine monoblocco: time-lapse dell'ultimo ciclo di carico (Drift=3%)

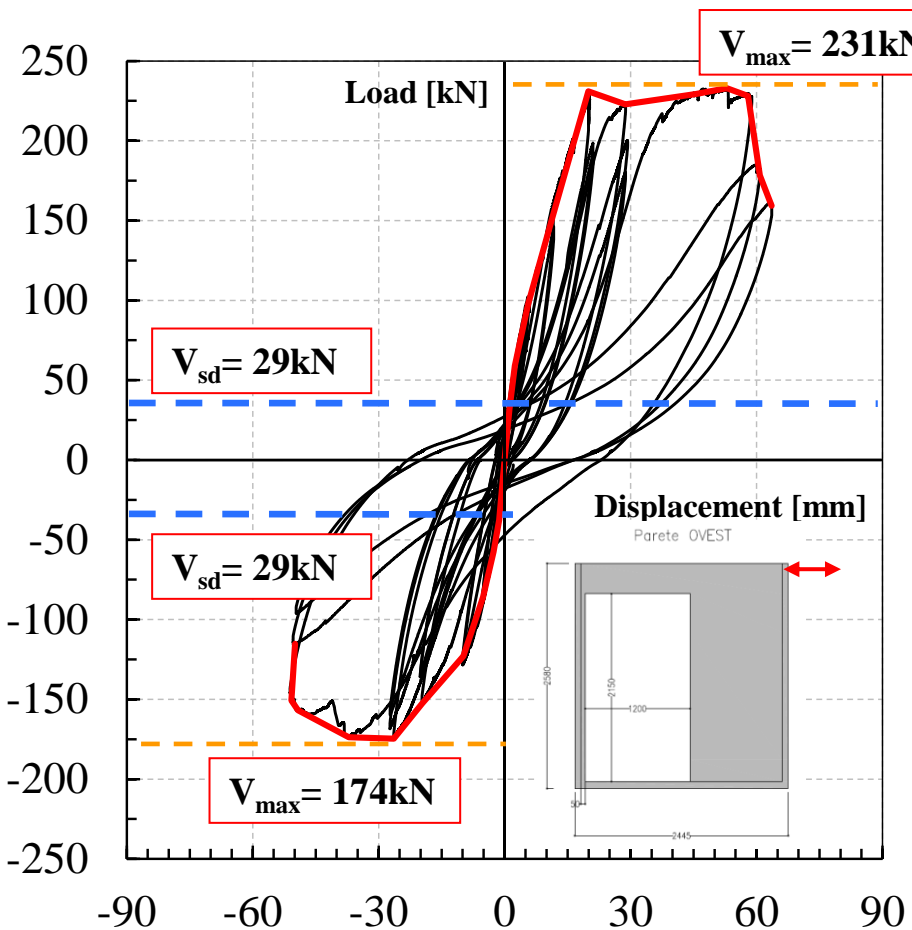


**Cabina con
armatura ibrida**

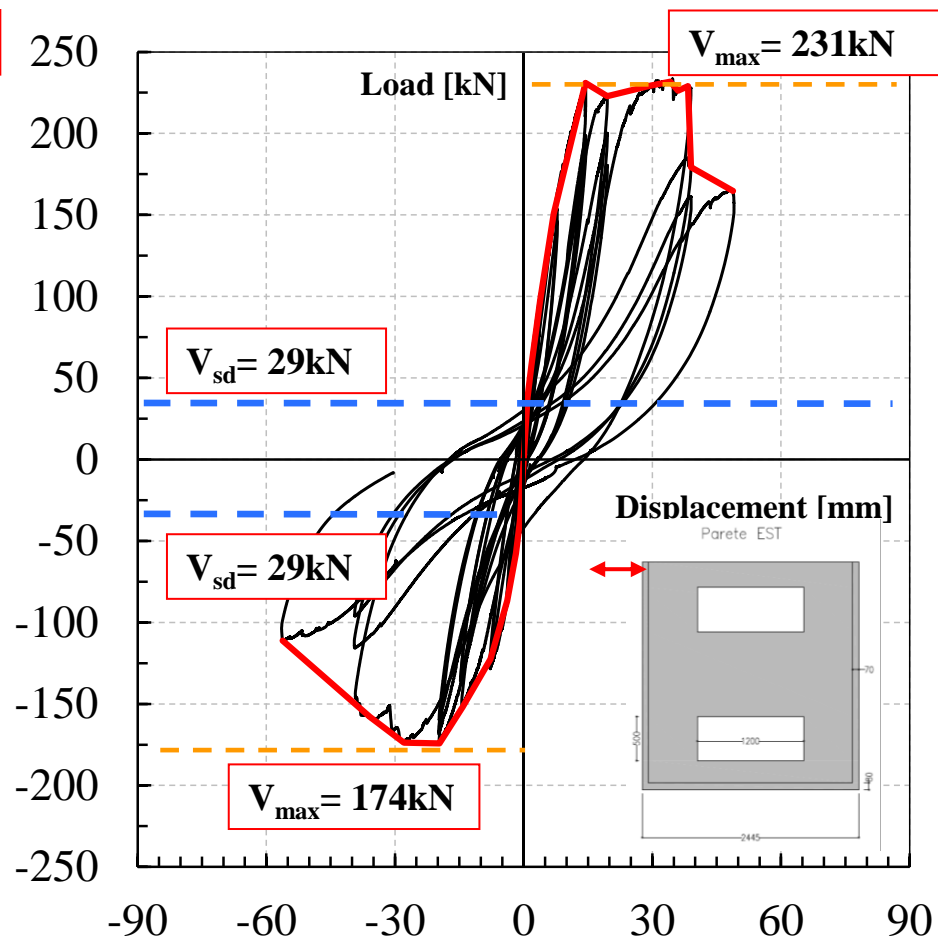


Prove su cabine monoblocco: curve cicliche della cabina in C.A.

**Curva carico – spostamento
laterale lato OVEST**



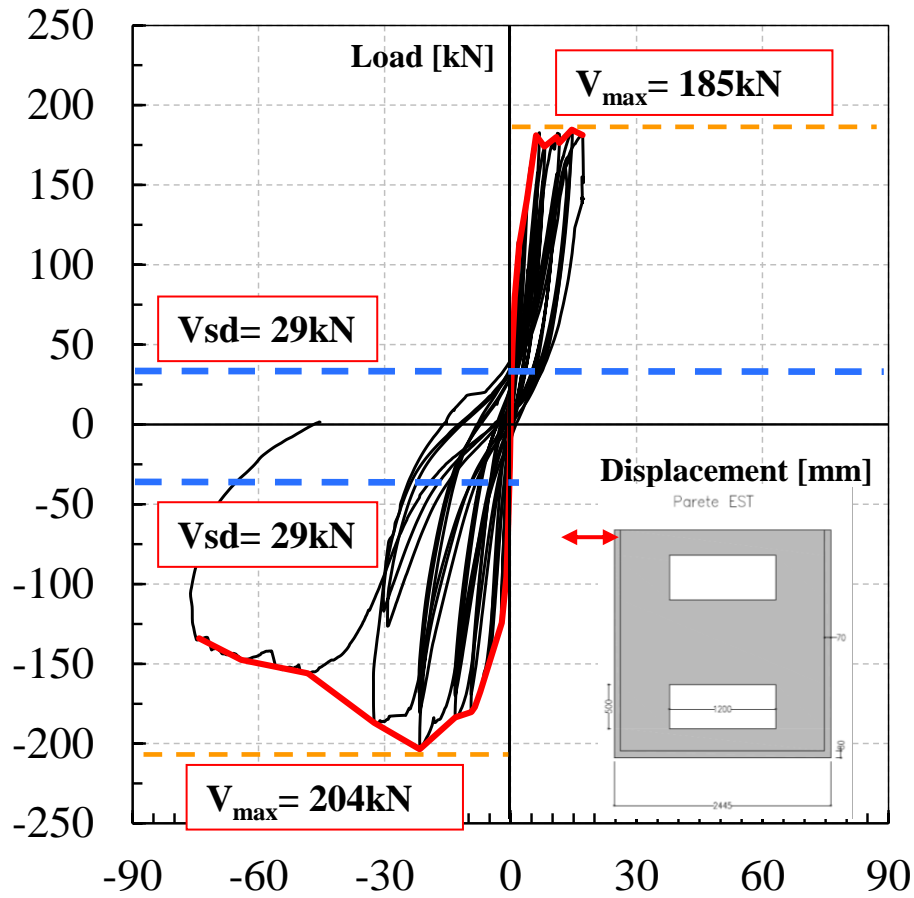
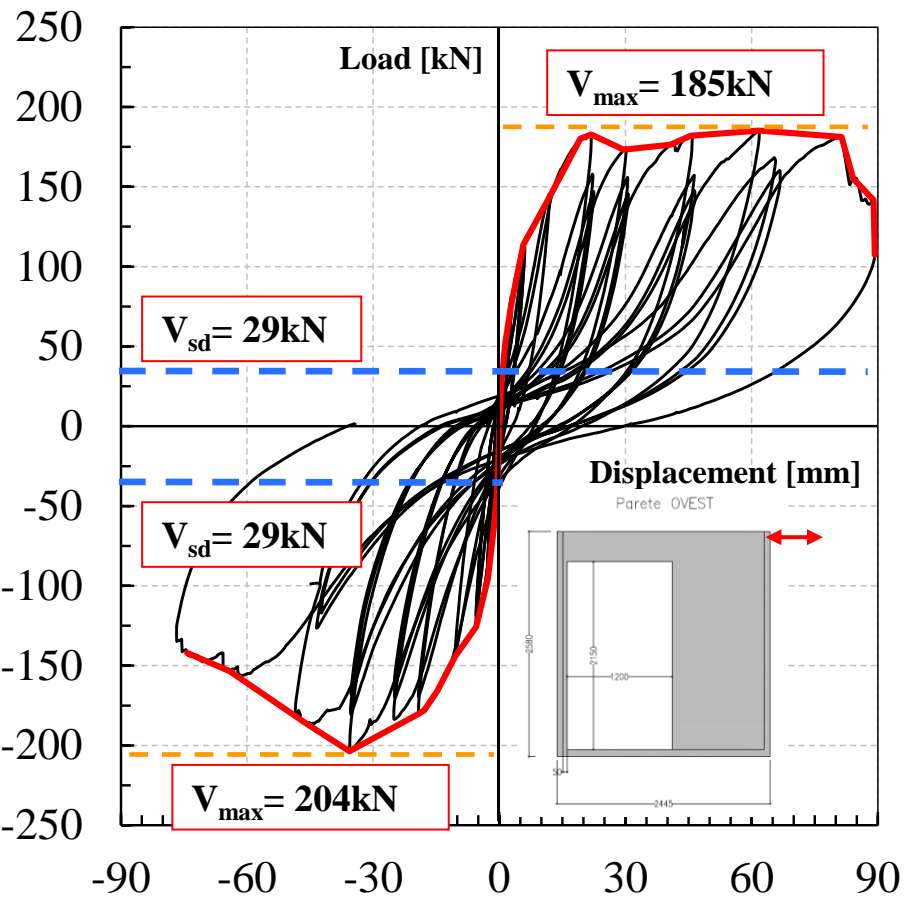
**Curva carico – spostamento
laterale lato EST**



Prove su cabine monoblocco: curve cicliche della cabina con armature ibride

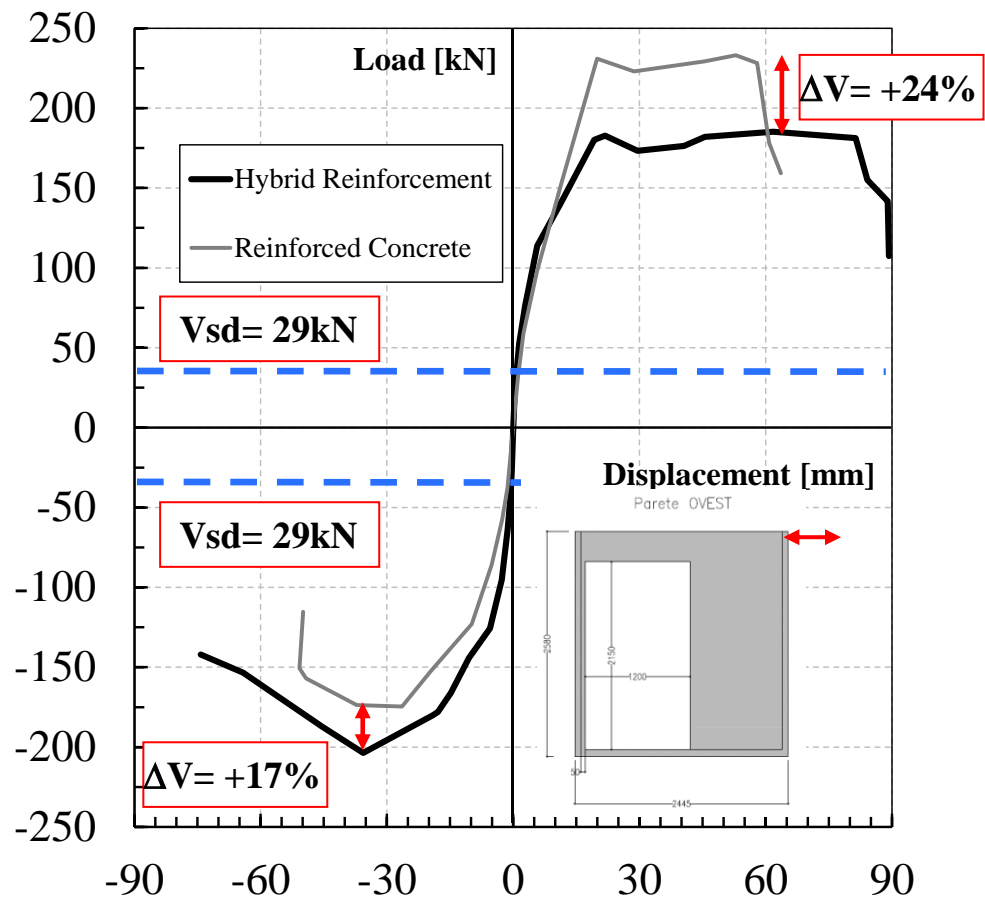
**Curva carico – spostamento
laterale lato OVEST**

**Curva carico – spostamento
laterale lato EST**

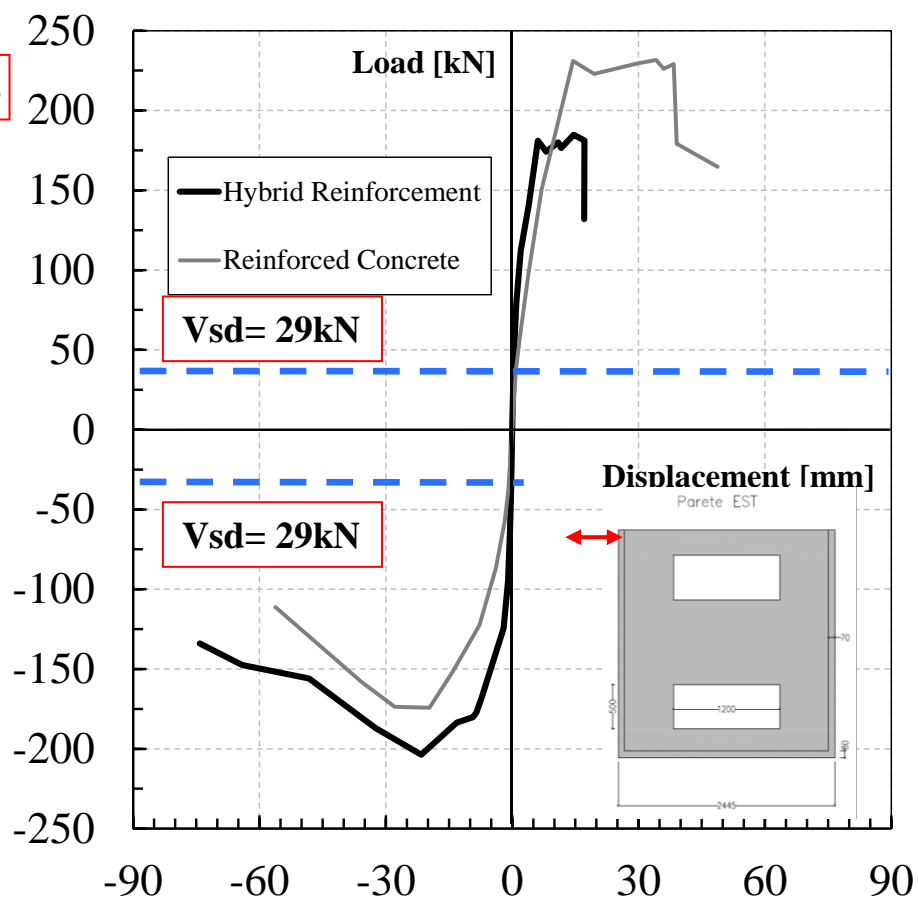


Prove su cabine monoblocco: confronto curve d'involuppo

Curva carico – spostamento laterale lato OVEST



Curva carico – spostamento laterale lato EST



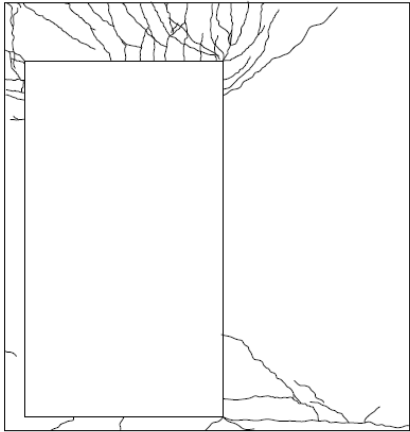


Prove su cabine monoblocco: confronto quadri fessurativi

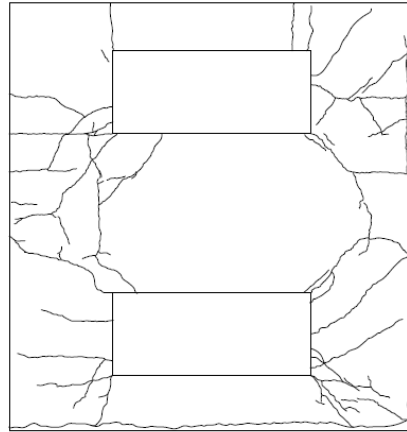
Quadri fessurativi rilevati al Drift 0.3% (spostamento laterale = 7mm)

Cabina in C.A.

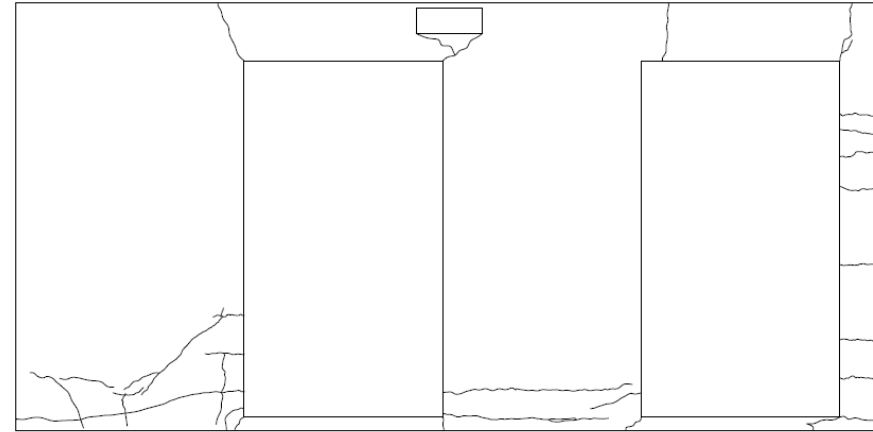
Parete OVEST



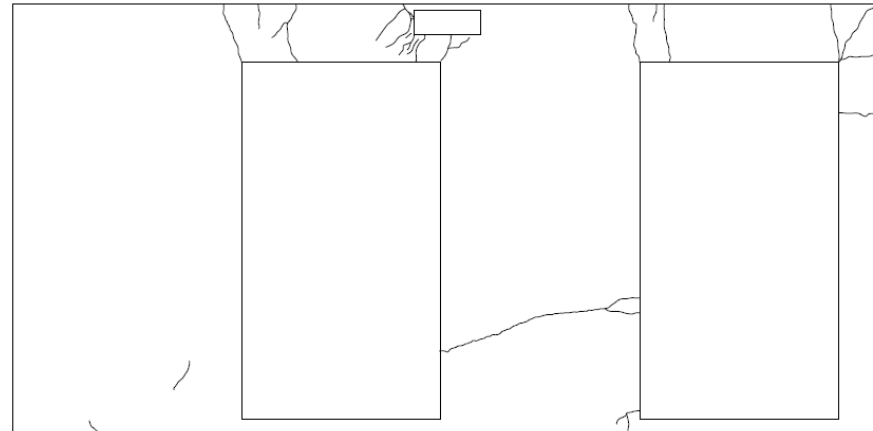
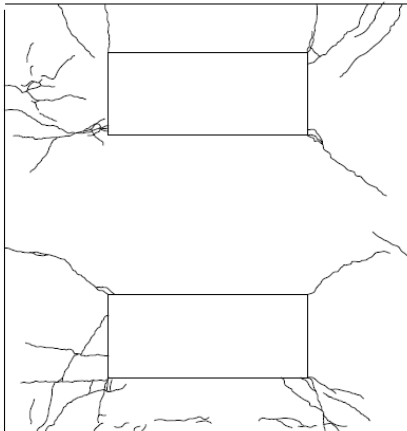
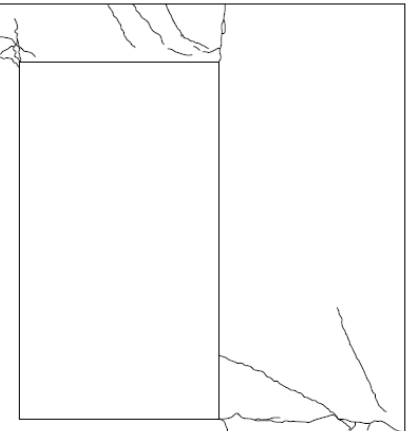
Parete EST



Parete SUD



Cabina in SFRSCC



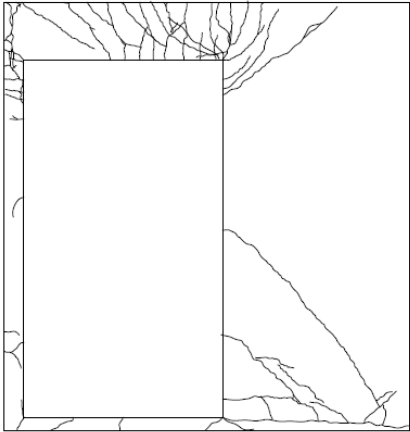


Prove su cabine monoblocco: confronto quadri fessurativi

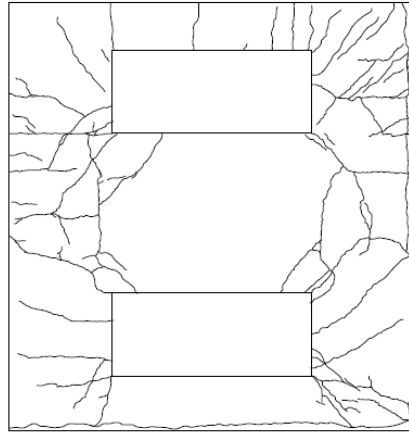
Quadri fessurativi finali

Cabina in C.A.

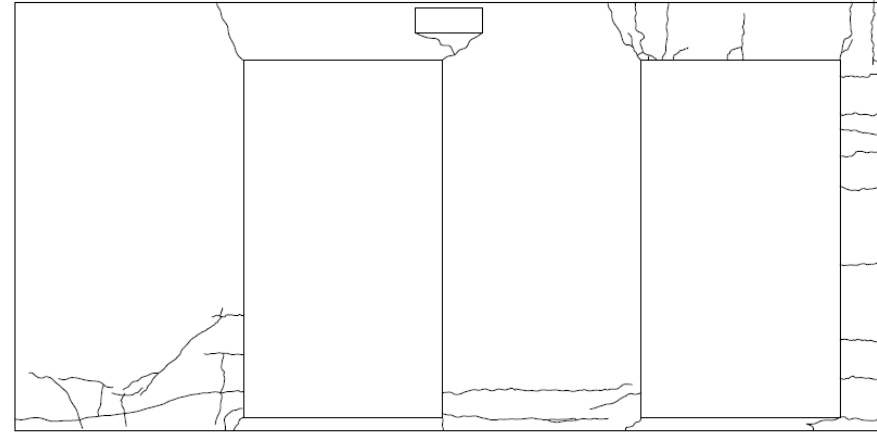
Parete OVEST



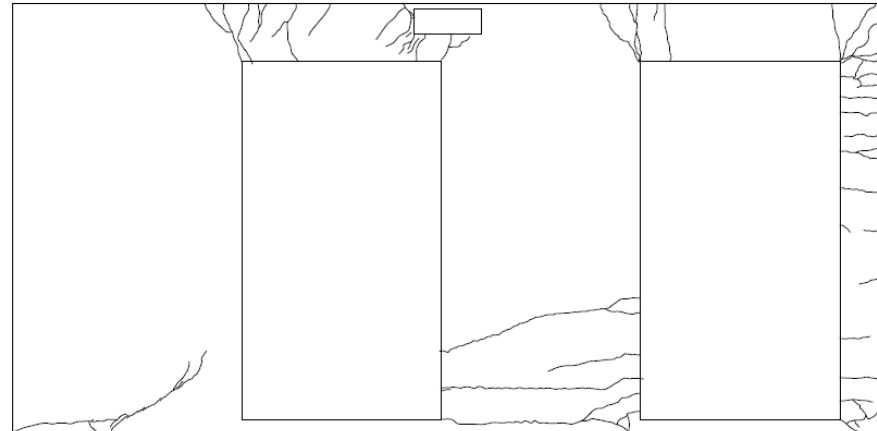
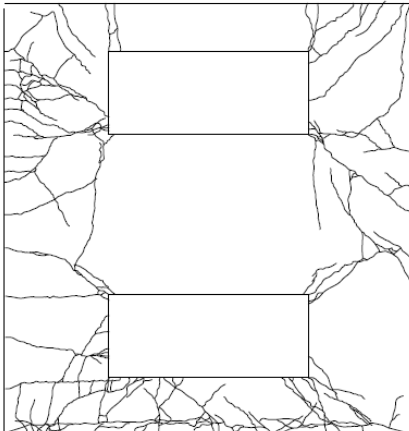
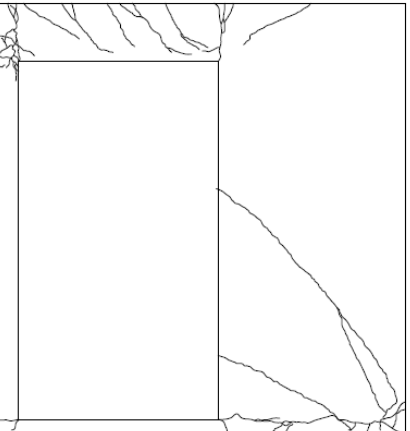
Parete EST



Parete SUD



Cabina in SFRSCC





Grazie per l'attenzione!



University of Brescia, Italy

